



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP UKUI-LIRIK

Abien Pria Aditama
NRP 07111440000120

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP UKUI-LIRIK

Abien Pria Aditama
NRP 07111440000120

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**FEASIBILITY STUDY OF 870 KW SOLAR POWER
GENERATION INSTALLATION ON PERTAMINA EP
UKUI-LIRIK ELECTRICAL SYSTEM**

Abien Pria Aditama
NRP 07111440000120

Supervisors
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP UKUI-LIRIK”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018

Abien Pria Aditama
07111440000120

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW
PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP
UKUI-LIRIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dimas Anton A., ST., MT., Ph.D.
NIP. 198109052005011002

Dosen Pembimbing II



Dr. Dimas Fajar U. P., ST., MT.
NIP. 198811082012121001



Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP UKUI-LIRIK

Nama Mahasiswa : Abien Pria Aditama
Dosen Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

Abstrak:

Perencanaan pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebesar 870 kW pada sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik memerlukan berbagai kajian. Khususnya kajian dari segi kelistrikan dan dari segi ekonomi. Dari segi kelistrikan dibutuhkan analisis aliran daya (*power flow*), hubung singkat (*short circuit*), stabilitas transien (*transient stability*), dan analisis koordinasi proteksi (*protection coordination*). Untuk melakukan analisis-analisis di atas, digunakan sebuah *software* penunjang yaitu *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP).

Dari segi ekonomi, beberapa hal yang perlu dikaji diantaranya adalah potensi energi yang mampu dihasilkan PLTS, perhitungan biaya investasi, biaya pembangkitan energi listrik, dan biaya yang dapat dihemat Pertamina EP Ukui-Lirik setelah menggunakan PLTS.

Kedua hasil kajian ini akan digunakan sebagai penentu kelayakan pemasangan PLTS pada sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik.

Kata kunci: PLTS, studi kelayakan, biaya pembangkitan

Halaman ini sengaja dikosongkan

FEASIBILITY STUDY OF 870 KW SOLAR POWER GENERATION INSTALLATION ON PERTAMINA EP UKUI-LIRIK ELECTRICAL SYSTEM

Student Name : Abien Pria Aditama
Supervisor I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Supervisor II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

Abstract:

Planning of solar power plant of 870 kW on Pertamina EP Ukui-Lirik electrical system requires various studies. Especially in terms of electricity and economic terms. Electrical analysis requires power flow analysis, short circuit analysis, transient stability analysis, and protection coordination analysis. To perform the above analyzes, used a supporting software that is Electrical Transient Analysis Program (ETAP).

In terms of economics, several things that need to be studied include the potential energy that can be generated by PLTS, calculation of investment costs, electricity generation costs, and costs that can be saved by Pertamina EP Ukui-Lirik after using PLTS.

Both results of this study will be used to determine the feasibility of installing PLTS on Pertamina EP Ukui-Lirik electrical system.

Key Word: PLTS, feasibility study, generation cost

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur senantiasa penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia yang luar biasa sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“STUDI KELAYAKAN PEMASANGAN PLTS 870 KW PADA SISTEM KELISTRIKAN PERTAMINA EP UKUI-LIRIK”**.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan Bapak penulis yang senantiasa mendoakan, memberi motivasi, dan nasihat selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D. dan Bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan inspirasi serta perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu selama menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
4. Teman-teman yang selalu membantu dan memberi semangat selama mengerjakan Tugas Akhir ini.

Penulis senantiasa berharap akan kritik dan saran dari semua pihak untuk pengembangan dan perbaikan Tugas Akhir ini. Penulis juga berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas khususnya dalam pengembangan energi terbarukan.

Surabaya, 15 Juli 2018

Abien Pria Aditama

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Gangguan Hubung Singkat	5
2.2.1 Hubung Singkat 3 Fasa	6
2.2.2 Hubung Singkat 2 Fasa	6
2.2.3 Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah.....	7
2.3 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor [4].....	8
2.3.2 Kestabilan Frekuensi [4]	8
2.3.3 Kestabilan Tegangan.....	9
2.4 Rele Arus Lebih [5].....	9
2.4.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika	9
2.4.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	10

2.4.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik	10
2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	11
2.5.1 Sel Surya / <i>Photovoltaic</i> (PV) <i>Cell</i> [7].....	11
2.5.2 Inverter.....	13
2.6 Pemasangan PV	13
2.7 Potensi Energi PLTS	14
2.8 <i>Net Present Value</i> (NPV).....	14
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM DAN SIMULASI.....	15
3.1 Single Line Diagram Pertamina EP Ukui-Lirik	15
3.2 Data Rating Tegangan Pertamina EP Ukui-Lirik.....	17
3.3 Data Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik	19
3.4 Data Generator Sinkron	21
3.5 Data Transformator	24
3.6 Data Governor.....	25
3.7 Perhitungan Jumlah PV	27
3.7.1 Jumlah PV untuk PLTS Lirik 750 kW	27
3.7.2 Jumlah PV untuk PLTS Ukui 120 kW	28
3.8 Simulasi	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Analisis Aliran Daya (Load Flow)	33
4.1.1 Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama.....	33
4.1.2 Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru	36
4.1.3 Daya Aktif Pembangkit Ukui.....	38
4.2 Analisis Hubung Singkat	39
4.2.1 Rating Peralatan <i>Breaker</i> PLTS Lirik	39
4.2.2 Rating Peralatan <i>Breaker</i> PLTS Ukui	39
4.2.3 Arus Hubung Singkat Tiap Bus	40
4.3 Koordinasi Proteksi PLTS	41

4.3.1 Koordinasi Proteksi PLTS Lirik.....	42
4.3.2 Koordinasi Proteksi PLTS Lirik.....	46
4.4 Analisis Stabilitas Transien	52
4.4.1 Stabilitas Transien Sistem Lirik Konfigurasi Lama	52
4.4.2 Stabilitas Transien Sistem Lirik Konfigurasi Baru.....	53
4.4.3 Stabilitas Transien Sistem Ukui	55
4.5 Analisis Ekonomi Pemasangan PLTS Lirik-Ukui	56
4.5.1 Potensi Energi PLTS Lirik	56
4.5.2 Biaya Investasi PLTS Ukui-Lirik.....	58
4.5.3 Biaya Pembangkitan Energi Listrik	62
4.5.4 Biaya Penghematan.....	63
4.5.5 <i>Net Present Value</i> PLTS Ukui-Lirik	64
BAB 5 KESIMPULAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA	69
BIODATA PENULIS.....	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah	6
Gambar 2.2	Hubung Singkat Dua Fasa	7
Gambar 2.3	Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	7
Gambar 2.4	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika	9
Gambar 2.5	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu ..	10
Gambar 2.6	Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik ..	10
Gambar 2.7	Hasil Pergerakan Elektron Pada Titik Sambung	12
Gambar 2.8	Titik Sambung Terkena Sinar Matahari	12
Gambar 2.9	Rangkaian Inverter Jembatan Penuh.....	13
Gambar 3.1	Konfigurasi Lama Sistem Kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik	15
Gambar 3.2	Konfigurasi Baru Sistem Kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik	16
Gambar 3.3	Lokasi Penempatan PLTS Pada Sistem Kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik	17
Gambar 4.1	Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Maksimum	34
Gambar 4.2	Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Rata-Rata	34
Gambar 4.3	Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Maksimum	35
Gambar 4.4	Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Rata-Rata	35
Gambar 4.5	Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru.	37
Gambar 4.6	Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru	37
Gambar 4.7	Grafik Daya Aktif Pembangkit Ukui	38
Gambar 4.8	Grafik Faktor Daya Pembangkit Ukui	38
Gambar 4.9	Diagram Segaris PLTS Lirik	42
Gambar 4.10	Kurva Koordinasi Peralatan Proteksi PLTS Lirik.....	45
Gambar 4.11	Diagram Segaris PLTS Ukui	46
Gambar 4.12	Kurva Koordinasi Peralatan Proteksi PLTS Ukui.....	51
Gambar 4.13	Respon Frekuensi Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Lama	52

Gambar 4.14 Respon Tegangan Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Lama53

Gambar 4.15 Respon Frekuensi Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Baru54

Gambar 4.16 Respon Tegangan Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Baru54

Gambar 4.17 Respon Frekuensi Pada Bus Pulai 380 V Setelah PLTS Ukui Lepas Dari Sistem.....55

Gambar 4.18 Respon Tegangan Pada Bus Pulai 380 V Setelah PLTS Ukui Lepas Dari Sistem.....56

Gambar 4.19 Rata-Rata Energi Harian yang Dihasilkan PLTS Lirik.57

Gambar 4.20 Rata-Rata Energi Harian yang Dihasilkan PLTS Ukui .58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel Konstanta Kurva Rele Arus Lebih Waktu Terbalik	11
Tabel 3.1	Rating Tegangan Bus Pertamina EP Ukui-Lirik	18
Tabel 3.2	Jenis, Ukuran, dan Panjang Kabel	19
Tabel 3.3	Resistansi Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik	20
Tabel 3.4	Data Generator Gas Ukui	21
Tabel 3.5	Data Generator Diesel Lirik	22
Tabel 3.6	Data Generator Gas Lirik	23
Tabel 3.7	Data Transformator Pembangkit Listrik Gas Lirik	24
Tabel 3.8	Data Transformator Ukui	24
Tabel 3.9	Data Transformator Tambahan	25
Tabel 3.10	Data Governor Generator Diesel Lirik	25
Tabel 3.11	Data Governor Generator Gas Lirik	26
Tabel 3.12	Data Governor Generator Gas Ukui	27
Tabel 3.13	Beban Pertamina EP Ukui-Lirik	30
Tabel 4.1	Arus Hubung Singkat Bus Interkoneksi PLTS Lirik	39
Tabel 4.2	Rating Peralatan PLTS Lirik	39
Tabel 4.3	Arus Hubung Singkat Bus Interkoneksi PLTS Ukui	40
Tabel 4.4	Rating Peralatan PLTS Ukui	40
Tabel 4.5	Arus Hubung Singkat Sistem Konfigurasi Baru	40
Tabel 4.6	Hasil Simulasi Transien PLTS Lirik Lepas Konfigurasi Lama	53
Tabel 4.7	Hasil Simulasi Transien PLTS Lirik Lepas Konfigurasi Baru	55
Tabel 4.8	Hasil Simulasi Transien PLTS Ukui Lepas	56
Tabel 4.9	Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Lirik	59
Tabel 4.10	Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Ukui	60
Tabel 4.11	Biaya Investasi PLTS Ukui-Lirik	61
Tabel 4.12	Biaya Operasional PLTG Ukui-Lirik dan Energinya	63
Tabel 4.13	<i>Net Present Value</i> PLTS Ukui-Lirik	65

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan energi baru dan terbarukan sebagai sumber energi dalam pembangkitan tenaga listrik mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Pada tahun 2015 saja, penggunaan energi baru dan terbarukan dalam pembangkitan tenaga listrik mencakup sekitar 23,5% dari total 24.100 TWh [1] . Salah satu energi terbarukan yang paling diminati adalah energi matahari. Energi listrik dari sinar matahari dibangkitkan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sayangnya, daya yang dihasilkan oleh PLTS sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari. Hal ini menyebabkan PLTS dihubungkan dengan sistem eksisting tanpa mengganti seluruh pembangkit pada sistem eksisting. Adanya pemasangan PLTS pada sistem eksisting mengakibatkan perubahan karakteristik sistem [2] sehingga perlu adanya peninjauan mengenai kelayakan pemasangan PLTS pada sistem tersebut.

Pemasangan PLTS pada sistem eksisting dapat menyebabkan perubahan level tegangan pada tiap-tiap bus akibat perubahan pola aliran daya sehingga perlu adanya analisis aliran daya (*power flow*). Selain analisis aliran daya, harus dilakukan analisis hubung singkat (*short circuit*) untuk menentukan *rating* peralatan yang akan dipasang. Melalui analisis hubung singkat nilai arus hubung singkat pada-tiap-tiap bus dapat diketahui. Besarnya arus hubung singkat selain digunakan untuk menentukan *rating* peralatan, juga digunakan sebagai dasar dalam melakukan koordinasi proteksi untuk melindungi peralatan yang terpasang pada sistem. Analisis lain yang perlu dilakukan adalah analisis stabilitas transien untuk mengetahui keadaan sistem saat terjadi gangguan berat secara tiba-tiba.

Selain dari segi kelistrikan, pemasangan PLTS juga harus memberikan dampak yang baik dari segi ekonomi. Oleh karena itu perlu adanya tinjauan dari segi ekonomi dalam pembangunan PLTS. Dalam melakukan analisis ekonomi, perhitungan potensi energi juga perlu dilakukan. Potensi energi diperlukan untuk perhitungan biaya pembangkitan energi listrik. Pembangunan PLTS akan memberikan manfaat jika pembangunan ini dapat menekan biaya konsumsi energi listrik.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Suplai daya generator serta faktor dayanya setelah dilakukan pemasangan PLTS pada sistem eksisting untuk nilai *irradiance* 0, 250, 500, 750, dan 1000
2. Nilai arus hubung singkat dan *rating* peralatan *breaker* yang harus dipasang setelah pemasangan PLTS
3. Koordinasi proteksi untuk melindungi peralatan baru pada saluran PLTS
4. Stabilitas tegangan dan frekuensi sistem setelah dilakukan pemasangan PLTS
5. Potensi energi yang mampu dihasilkan PLTS
6. Perhitungan biaya investasi, biaya pembangkitan energi listrik, dan analisis *Net Present Value* sebagai penentu kelayakan dari segi ekonomi.

1.3 Tujuan

Penyusunan tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui suplai daya dan faktor daya generator setelah pemasangan PLTS serta melakukan perbaikan apabila memang diperlukan
2. Mengetahui besarnya arus hubung singkat dan menentukan rating peralatan *breaker* yang harus dipasang berdasarkan besarnya arus hubung singkat
3. Melakukan koordinasi proteksi untuk peralatan pada titik sambung PLTS
4. Mengetahui stabilitas sistem ketika terjadi gangguan serta mencari solusi jika terjadi masalah transien
5. Mendapatkan nilai energi yang dapat dihasilkan oleh PLTS
6. Mendapatkan nilai biaya investasi, biaya pembangkitan energi listrik, dan menilai kelayakan pembangunan PLTS dari segi ekonomi.

1.4 Batasan Masalah

Penulisan tugas akhir ini terbatas pada:

1. Stabilitas transien terbatas pada kasus lepasnya PLTS dari sistem

2. Koordinasi proteksi dilakukan hanya pada peralatan baru yang tersambung PLTS
3. Simulasi kelistrikan dilakukan dengan perangkat lunak *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP)
4. Perhitungan potensi energi dilakukan dengan perangkat lunak PVsyst.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur
Studi literatur bertujuan untuk mempelajari teori dasar mengenai analisis yang akan dilakukan, seperti analisis aliran daya, hubungan singkat, stabilitas transien, koordinasi proteksi serta perhitungan biaya-biaya. Studi literatur akan mempermudah analisis data.
2. Pengumpulan data
Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data yang akan digunakan untuk simulasi yaitu data-data peralatan, gambar diagram segaris, data cuaca untuk menentukan potensi energi, dan data-data lainnya.
3. Pemodelan Sistem
Data-data yang sudah dikumpulkan akan digunakan untuk pemodelan sistem. Pemodelan yang perlu dilakukan antara lain pemodelan sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik serta pemodelan PLTS untuk mencari potensi energi.
4. Simulasi dan Analisis
Setelah pemodelan sistem kelistrikan dan PLTS selesai, dilakukan simulasi dan diambil data sesuai dengan analisis yang akan dilakukan. Hasil analisis akan digunakan untuk menentukan langkah perbaikan sistem apabila kinerja sistem masih belum optimal.
5. Penulisan buku
Penulisan buku dilakukan sesuai dengan penelitian yang dilakukan dan sesuai dengan format yang ditentukan

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab 2 : Tinjauan Pustaka
Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.
- Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan
Bab ini berisi tentang data-data yang akan digunakan untuk pemodelan sistem, baik pemodelan sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik maupun pemodelan PLTS.
- Bab 4 : Simulasi dan Analisis
Bab ini menampilkan data hasil simulasi yang dilakukan dengan ETAP dan Pvsyst sekaligus melakukan analisis data hasil simulasi.
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan penilaian mengenai kelayakan pemasangan PLTS pada sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik yang ditinjau dari segi kelistrikan melalui analisis aliran daya, hubung singkat, stabilitas transien, serta koordinasi proteksi dan dari segi ekonomi melalui perhitungan biaya investasi, biaya pembangkitan serta biaya penghematan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik

Analisis aliran daya merupakan studi dasar yang berguna untuk menganalisis suatu sistem kelistrikan. Analisis aliran daya mempunyai beberapa tujuan, diantaranya untuk mengetahui tegangan dan sudut fasa pada tiap-tiap bus, mengetahui kemampuan peralatan dalam menyalurkan daya yang diinginkan, dan sebagai kondisi awal untuk perencanaan sistem yang baru. Analisis aliran daya memberikan data berupa tegangan, sudut tegangan, daya aktif, dan daya reaktif pada setiap bus dalam kondisi *steady state* [3]. Dengan analisis ini, proses transfer daya dari pembangkit menuju beban dapat diamati dengan jelas.

2.2 Gangguan Hubung Singkat

Dalam penyaluran tenaga listrik, sering terjadi gangguan yang menyebabkan terputusnya aliran daya listrik dari pembangkit menuju beban. Gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat menghasilkan arus yang sangat besar yang mengalir menuju titik gangguan. Arus yang sangat besar ini muncul akibat kontribusi dari generator, motor, dan grid. Tegangan pada titik gangguan biasanya sangat kecil bahkan mendekati nol.

Penyebab terjadinya gangguan hubung singkat dibedakan menjadi dua faktor, yakni faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal yang dapat menyebabkan terjadinya hubung singkat diantaranya rusaknya peralatan listrik yang dipasang, rusaknya isolasi pada peralatan listrik, kesalahan instalasi, dan lain sebagainya. Sedangkan faktor eksternal yang dapat menyebabkan gangguan hubung singkat diantaranya cuaca buruk seperti hujan lebat yang disertai angin sehingga pohon tumbang mengenai saluran listrik, bencana seperti gempa bumi, kecelakaan, dan masih banyak lagi lainnya.

Arus hubung singkat memiliki nilai maksimum dan minimum. Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk menentukan *capability* peralatan dan didapat saat fase subtransien. Sedangkan arus hubung singkat minimum digunakan dalam koordinasi proteksi dan didapat saat fase *steady state*.

Berdasarkan kesimetrisannya, gangguan hubung singkat dibedakan menjadi dua, yaitu gangguan hubung singkat simetris dan gangguan hubung singkat asimetris. Dinamakan hubung singkat simetris karena semua fasanya mengalami gangguan sehingga nilai arus dan tegangan pada setiap fasanya sama. Hubung singkat 3 fasa dan hubung singkat 3 fasa ke tanah merupakan hubung singkat simetris. Sedangkan hubung singkat asimetris merupakan hubung singkat yang menyebabkan arus yang mengalir pada ketiga fasa nilainya tidak seimbang. Hubung singkat yang dikategorikan sebagai hubung singkat asimetris adalah hubung singkat fasa ke fasa, hubung singkat 2 fasa ke tanah, dan hubung singkat 1 fasa ke tanah.

2.2.1 Hubung Singkat 3 Fasa

Pada hubung singkat ini, ketiga fasa mengalami gangguan.



Gambar 2.1 Hubung Singkat Tiga Fasa ke Tanah

Besarnya arus hubung singkat 3 fasa dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$I_{sc_{3\phi}} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \quad (2.1)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} I_{sc_{3\phi}} &= \text{Arus hubung singkat 3 fasa} \\ V_{LN} &= \text{Tegangan line to netral} \\ Z_1 &= \text{Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan} \end{aligned}$$

2.2.2 Hubung Singkat 2 Fasa

Hubung singkat ini terjadi ketika dua dari tiga penghantar saling bersentuhan (R-S, S-T, atau T-R). Nilai arus hubung singkat 2 fasa dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$I_{sc_{2\phi}} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2 \times Z_1} \approx 0.866 I_{sc_{3\phi}} \quad (2.2)$$

Dengan:

- $I_{sc_{2\phi}}$ = Arus hubung singkat 2 fasa
- V_{LL} = Tegangan *line to line*
- Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan
- Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan



Gambar 2.2 Hubung Singkat Dua Fasa

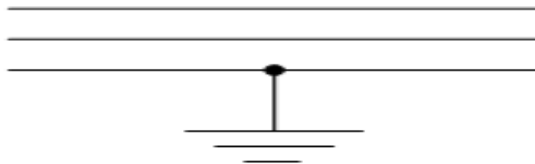
2.2.3 Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Hubung singkat ini terjadi ketika salah satu fasa terhubung ke tanah. Nilai arus hubung singkat 1 fasa dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$I_{sc_{1\phi}} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.3)$$

Dengan:

- $I_{sc_{1\phi}}$ = Arus hubung singkat 1 fasa ke tanah
- V_{LN} = Tegangan *line to netral*
- Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan
- Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan
- Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan



Gambar 2.3 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

2.3 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem dikatakan stabil apabila setelah terjadi gangguan, sistem dapat kembali dalam kondisi seimbang. Dalam sebuah sistem tenaga listrik yang beroperasi pada kondisi stabil, daya input mekanis pada *prime mover* generator dan daya yang dibutuhkan oleh beban berada

pada kondisi seimbang. Pada keadaan seimbang ini, generator pada sistem tenaga listrik berputar pada kecepatan sinkron. Ketika terjadi suatu gangguan, maka sistem tenaga listrik akan terkena dampak yang cukup signifikan. Gangguan dibedakan menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Penambahan beban secara perlahan yang tidak berpengaruh signifikan pada sistem dapat dianggap sebagai gangguan kecil. Sedangkan gangguan besar adalah gangguan yang berakibat fatal pada sistem apabila gangguan tersebut tidak segera diatasi. Dalam analisis kestabilan, masalah kestabilan dibagi menjadi dua kategori, yaitu kestabilan *steady state* dan kestabilan transien. Kestabilan *steady state* merupakan kemampuan sistem untuk kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan kecil seperti kenaikan beban secara bertahap. Sedangkan kestabilan transien adalah kemampuan sistem untuk bekerja secara normal pada kondisi operasi baru setelah terjadi gangguan yang cukup besar dan terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya suatu pembangkit. Batasan waktu yang biasanya digunakan dalam analisis suatu sistem adalah 3 sampai 5 detik.

Menurut paper IEEE yang berjudul “*Definition and Classification of Power System Stability*”, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor [4]

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang terinterkoneksi dengan suatu sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk menyeimbangkan torsi elektromagnetis dan torsi mekanis pada setiap mesin sinkron yang ada pada sistem. Ketika terjadi suatu gangguan, kesetimbangan antara torsi elektromagnetis dan torsi mekanis akan ikut terganggu dan menyebabkan percepatan atau perlambatan rotor. Jika suatu generator bergerak lebih cepat dibanding generator yang lain, maka posisi sudut rotornya akan mengalami perbedaan dari generator yang bergerak lebih lambat. Akibatnya beban akan ditransfer menuju generator yang bergerak lebih cepat.

2.3.2 Kestabilan Frekuensi [4]

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi setelah terjadi gangguan. Ketika terjadi

penambahan atau pelepasan beban secara tiba-tiba, daya yang disuplai oleh generator dan daya yang dibutuhkan oleh beban menjadi tidak seimbang. Akibatnya rotor mengalami perubahan kecepatan sehingga frekuensi akan berubah. Apabila governor tidak dapat melakukan kontrol, maka frekuensi sistem akan mengalami ketidakstabilan. Berdasarkan standar PLN, batas fluktuasi frekuensi yang diperbolehkan adalah $\pm 1\%$ dari nilai nominal.

2.3.3 Kestabilan Tegangan

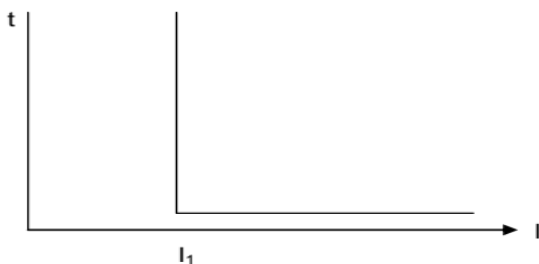
Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada semua titik setelah terjadi gangguan. Kestabilan tegangan bergantung pada keseimbangan daya pembangkit dan daya yang dibutuhkan beban. Berdasarkan PUIL 2000, toleransi tegangan yang diperbolehkan untuk beban memiliki nilai -10% dan $+5\%$.

2.4 Rele Arus Lebih [5]

Koordinasi proteksi dalam sistem tenaga listrik dilakukan dengan cara *mensetting* rele. Rele arus lebih dapat digunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan beban lebih maupun hubung singkat. Rele arus lebih dapat bekerja jika arus gangguan lebih besar nilainya dibanding arus *setting* yang ada pada rele. Rele arus lebih memiliki tiga karakteristik, yaitu rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous relay*), rele arus lebih waktu tertentu (*definite time relay*), dan rele arus lebih waktu terbalik (*inverse relay*).

2.4.1 Rele Arus Lebih Waktu Seketika

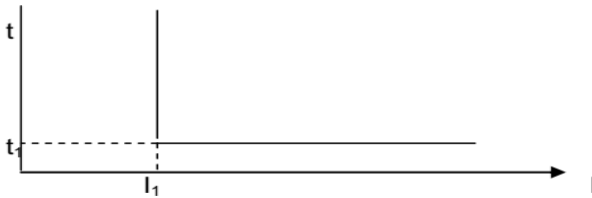
Rele dengan karakteristik ini akan bekerja secara langsung tanpa ada waktu tunda ketika arus yang mengalir melebihi nilai arus *setting*nya.



Gambar 2.4 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

2.4.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

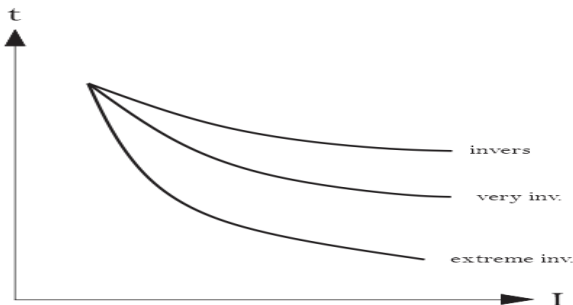
Karakteristik rele ini hampir sama dengan rele arus lebih waktu seketika, tetapi pada rele ini waktu kerja dari rele diperpanjang sesuai dengan waktu yang diinginkan dan tidak bergantung pada besarnya arus yang mengalir. Gambar di bawah adalah kurva karakteristik rele arus lebih waktu tertentu.



Gambar 2.5 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu [5]

2.4.3 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Rele arus lebih waktu terbalik adalah rele arus lebih yang bekerja sesuai dengan besarnya arus yang mengalir. Dinamakan rele arus lebih waktu terbalik karena semakin besar arus yang mengalir maka rele akan bekerja semakin cepat. Bentuk kurva dari rele arus lebih waktu terbalik juga bermacam-macam. Secara umum, bentuk kurva rele arus lebih waktu terbalik digolongkan menjadi 3, yaitu kurva rele arus lebih terbalik biasa (*standard inverse*), sangat terbalik (*very inverse*), dan sangat terbalik sekali (*extremely inverse*).



Gambar 2.6 Kurva Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Setting rele arus lebih dilakukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$1.05 I_{FLA} \leq I_{set} \leq 1.4 I_{FLA} \quad (2.4)$$

I_{FLA} adalah arus beban penuh serta I_{set} adalah arus *pick up*. Persamaan (2.4) bertujuan untuk menentukan batas arus rele mulai bekerja. Dalam setting rele arus lebih waktu terbalik, kelengkungan kurva dapat diatur dengan mengatur *time dial*. Berikut adalah persamaan untuk menghitung *time dial* untuk rele dengan merk Merlin Gerin SEPAM 1000 [6].

$$t = \frac{a}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^b - 1} x \frac{k}{c} \quad (2.5)$$

Dengan:

- t = *time delay*
- k = *time dial* (menentukan kelengkungan kurva)
- I = arus hubung singkat
- I_{set} = arus *pick up* rele
- a dan b = konstanta kurva invers yang tertera pada Tabel 2.1
- c = konstanta yang tergantung merk rele

Tabel 2.1 Tabel Konstanta Kurva Rele Arus Lebih Waktu Terbalik

Jenis Kurva Rele Arus Lebih	Konstanta		
	a	b	c
<i>Standars Inverse</i>	0,14	0,02	2,97
<i>Very Inverse</i>	13,5	1	1,5
<i>Extremely Inverse</i>	80	2	0,808

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

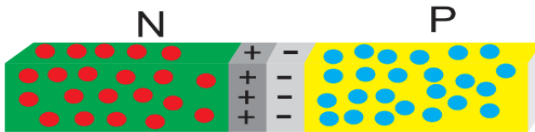
PLTS merupakan salah satu jenis pembangkit listrik energi terbarukan yaitu menggunakan energi matahari. Untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik, PLTS membutuhkan beberapa komponen penyusun utama, diantaranya adalah sel surya dan inverter.

2.5.1 Sel Surya / *Photovoltaic (PV) Cell* [7]

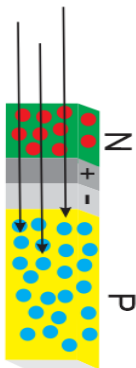
PV merupakan piranti utama yang harus ada dalam PLTS. PV mampu mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan PV merupakan listrik searah. Bahan utama penyusun PV

adalah semikonduktor. Bahan semikonduktor yang paling banyak digunakan untuk pembuatan PV adalah silikon.

Jenis semikonduktor yang digunakan dalam PV adalah semikonduktor jenis N dan P. Semikonduktor jenis N merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sedangkan semikonduktor jenis P adalah semikonduktor yang kelebihan *hole* yang menyebabkan semikonduktor ini kelebihan muatan positif. Dalam PV, kedua semikonduktor ini disambung. Pada daerah disekitar sambungan, elektron akan mulai bergerak mengisi *hole* sehingga daerah yang ditinggalkan elektron akan menjadi sedikit bermuatan positif dan daerah yang terisi elektron akan menjadi sedikit bermuatan negatif seperti terlihat pada Gambar 2.5. Adanya perbedaan muatan menimbulkan munculnya medan listrik pada daerah sambungan. Medan listrik ini akan menyebabkan jumlah elektron dan jumlah *hole* menjadi seimbang.



Gambar 2.7 Hasil Pergerakan Elektron Pada Titik Sambung



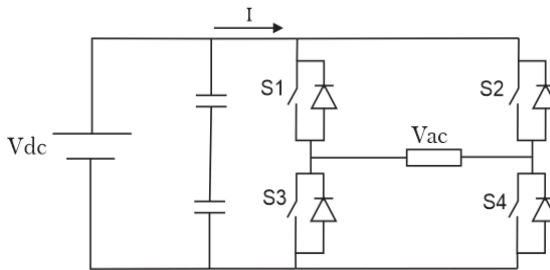
Gambar 2.8 Titik Sambung Terkena Sinar Matahari

Pada PV, semikonduktor N diletakkan pada bagian atas dan dibuat lebih tipis dari semikonduktor P sehingga ketika cahaya matahari menyinari PV, cahaya dapat menembus hingga titik sambung

semikonduktor N dan P. Ketika cahaya matahari yang mengandung photon mencapai titik sambung, elektron yang mengisi *hole* akan terlepas seperti terlihat pada Gambar 2.6. Ketika elektron lepas dari *hole*, elektron akan tertarik kembali pada semikonduktor N. Proses ini dinamakan proses fotogenerasi. Apabila PV ini dihubungkan dengan suatu rangkaian, maka elektron akan mengalir.

2.5.2 Inverter

Inverter adalah perangkat *power electronics* yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Pada PLTS, perangkat ini digunakan untuk mengubah listrik searah yang dihasilkan oleh PV menjadi listrik bolak-balik.



Gambar 2.9 Rangkaian Inverter Jembatan Penuh

Gambar di atas adalah gambar rangkaian inverter jembatan penuh. Untuk menghasilkan tegangan AC, saklar S1 dan S4 harus dinyalakan secara bersamaan dan saklar S2 dan S3 berada pada kondisi padam. Lama penyalan ditentukan oleh frekuensi yang ingin dibangkitkan. Untuk menghasilkan frekuensi 50 Hz, maka lama penyalan untuk tiap pasang saklar adalah 10 ms secara bergantian.

2.6 Pemasangan PV

Pemasangan PV sangat mempengaruhi energi yang dapat dihasilkan PLTS. Pemasangan PV harus memperhatikan gerak semu tahunan matahari. Setiap tahun matahari akan bergerak dari belahan bumi utara menuju belahan bumi selatan akibat dari kemiringan bumi yang mencapai 23,5°. Untuk daerah yang berada pada belahan bumi selatan,

PV dipasang menghadap ke arah utara. Sedangkan untuk daerah yang berada pada belahan bumi utara, PV dipasang menghadap ke arah selatan.

2.7 Potensi Energi PLTS

Energi yang dapat dihasilkan PLTS sangat bergantung pada radiasi sinar matahari dan lamanya waktu penyinaran. Untuk mendapatkan lama penyinaran matahari dapat dihitung dengan:

$$\text{Lama penyinaran (jam)} = \frac{\text{Jumlah sinar global (Wh/m}^2\text{)}}{\text{Maksimum sinar global (W/m}^2\text{)}} \quad (2.6)$$

Dengan mengetahui lama penyinaran dalam satu hari, maka potensi energi PLTS dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Energi} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{hari}} \right) = \text{Daya nom. PV (Watt)} \times \text{Lama penyinaran (jam)} \quad (2.7)$$

2.8 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) adalah suatu metode analisis keuangan yang memperhatikan nilai uang dengan faktor waktu[8]. NPV merupakan nilai keuntungan yang ada di masa depan yang diproyeksikan pada periode awal investasi melalui pemotongan nilai dengan faktor pengurang berupa suku bunga. NPV biasanya digunakan untuk menentukan kelayakan suatu investasi. Jika NPV bernilai positif, maka investasi dianggap menguntungkan. Jika NPV bernilai negatif, maka pengerjaan proyek akan dibatalkan. NPV biasa digunakan sebagai penentu kelayakan pengerjaan proyek dilihat dari segi ekonomi. NPV dapat dihitung dari persamaan berikut.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1-i)^t} - C_o \quad (2.8)$$

Dengan

C_t adalah keuntungan pada tahun t

C_o adalah total biaya investasi

i adalah suku bunga

t adalah umur proyek

Tabel 3.1 Rating Tegangan Bus Pertamina EP Ukui-Lirik

No	Bus ID	Tegangan (kV)
1	Bus UKUI	2,400
2	Bus 1 PLTG LIRIK	13,800
3	Bus Andan	13,800
4	Bus Camp	13,800
5	BUS DI1	2,400
6	BUS DI2	2,400
7	BUS DI3	2,400
8	BUS DI4	2,400
9	BUS DI5	2,400
10	Bus Molek	13,800
11	Bus P1	13,800
12	Bus PLTD LIRIK	2,400
13	Bus PLTD LIRIK 2	13,800
14	Bus Pulai1	13,800
15	Bus Pulai2	13,800
16	Bus Pulai 13,8 kV	13,800
17	Bus Pulai 380 V	0,380
18	BUS SB	13,800
19	BUS SK 1	13,800
20	Bus WI 01	13,800
21	Bus2 PLTG Lirik	13,800

Tabel 3.1 Rating Tegangan Bus Pertamina EP Ukui-Lirik

No	Bus ID	Tegangan (kV)
22	GT 1	0,480
23	GT 2	4,160
24	GT 3	4,160
25	GT 4	4,160
26	Node Interkoneksi	13,800

3.3 Data Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik

Tabel 3.2 Jenis, Ukuran, dan Panjang Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik

No.	ID	Jenis	Ukuran (mm ²)	Panjang (ft)
1	Kabel Bus Pulai 1	15MALS3	35	3280
2	Kabel Bus Pulai 2	15MALS3	35	3280
3	Kabel Camp 01	15MALS3	35	164
4	Kabel DI 1	20NCUS3	240	98,4
5	Kabel DI 2	20NCUS3	240	98,4
6	Kabel DI 3	20NCUS3	240	98,4
7	Kabel DI 4	20NCUS3	240	94,4
8	Kabel DI 5	20NCUS3	240	98,4
9	Kabel Interkoneksi 1	15MALS3	35	6561,7
10	Kabel Interkoneksi 2	15MALS3	35	45931,8
11	Kabel Interkoneksi 3	15MALS3	35	52,5

Tabel 3.2 Jenis, Ukuran, dan Panjang Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik

No.	ID	Jenis	Ukuran (mm ²)	Panjang (ft)
12	Kabel Molek 01	15MALS3	35	164
13	Kabel SB 01	15MALS3	35	164
14	Kabel SK 01	15MALS3	35	164
15	Kabel WI 01	15MALS3	35	164

Tabel 3.3 Resistansi Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik

No.	ID	Suhu (°C)	R (ohm/1000 ft)	X (ohm/1000 ft)
1	Kabel Bus Pulai 1	75	0,309671	0,044915
2	Kabel Bus Pulai 2	75	0,309671	0,044915
3	Kabel Camp 01	75	0,309671	0,044915
4	Kabel DI 1	75	0,028635	0,034747
5	Kabel DI 2	75	0,028635	0,034747
6	Kabel DI 3	75	0,028635	0,034747
7	Kabel DI 4	75	0,028635	0,034747
8	Kabel DI 5	75	0,028635	0,034747
9	Kabel Interkoneksi 1	75	0,309671	0,044915
10	Kabel Interkoneksi 2	75	0,309671	0,044915
11	Kabel Interkoneksi 3	75	0,309671	0,044915

Tabel 3.3 Resistansi Kabel Pertamina EP Ukui-Lirik

No.	ID	Suhu (°C)	R (ohm/1000 ft)	X (ohm/1000 ft)
12	Kabel Molek 01	75	0,309671	0,044915
13	Kabel SB 01	75	0,309671	0,044915
14	Kabel SK 01	75	0,309671	0,044915
15	Kabel WI 01	75	0,309671	0,044915

3.4 Data Generator Sinkron

Tabel 3.4 Data Generator Gas Ukui

ID	GT U 1	GT U 2	GT U 3	GT U 4
Model	Subtransient, Round-Rotor	Subtransient, Round-Rotor	Subtransient, Round-Rotor	Subtransient, Round-Rotor
MVA	0,941	0,941	0,941	0,941
kV	2,400	2,400	2,400	2,400
Ra	1,00	1,00	1,00	1,00
Xd''	19,00	19,00	19,00	19,00
Xd'	28,00	28,00	28,00	28,00
Xd	155,00	155,00	155,00	155,00
Xq''	19,00	19,00	19,00	19,00
Xq'	65,00	65,00	65,00	65,00
Xq	155,00	155,00	155,00	155,00
Xl	15,00	15,00	15,00	15,00

Tabel 3.4 Data Generator Gas Ukui

ID	GT U 1	GT U 2	GT U 3	GT U 4
X/R	7,00	7,00	7,00	7,00
R0	1,00	1,00	1,00	1,00
X0	7,00	7,00	7,00	7,00

Tabel 3.5 Data Generator Diesel Lirik

ID	DI 1	DI 2	DI 3	DI 4	DI 5
Model	Subtran sient, Round- Rotor	Subtran sient, Round- Rotor	Subtran sient, Round- Rotor	Subtran sient, Round- Rotor	Subtran sient, Round- Rotor
MVA	1,125	1,125	1,125	1,125	1,125
kV	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
Ra	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Xd''	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
Xd'	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
Xd	155,00	155,00	155,00	155,00	155,00
Xq''	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
Xq'	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Xq	155,00	155,00	155,00	155,00	155,00
Xl	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
X/R	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
R0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
X0	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00

Tabel 3.6 Data Generator Gas Lirik

ID	Gas T 1	Gas T 2	Gas T 3	Gas T 4
Model	Subtransient, Round- Rotor	Subtransient, Round- Rotor	Subtransient, Round- Rotor	Subtransient, Round- Rotor
MVA	4,100	4,100	4,100	4,100
kV	4,160	4,160	4,160	4,160
Ra	1,00	1,00	1,00	1,00
Xd''	19,00	19,00	19,00	19,00
Xd'	28,00	28,00	28,00	28,00
Xd	155,00	155,00	155,00	155,00
Xq''	19,00	19,00	19,00	19,00
Xq'	65,00	65,00	65,00	65,00
Xq	155,00	155,00	155,00	155,00
Xl	15,00	15,00	15,00	15,00
X/R	7,00	7,00	7,00	7,00
R0	1,00	1,00	1,00	1,00
X0	7,00	7,00	7,00	7,00

3.5 Data Transformator

Tabel 3.7 Data Transformator Pembangkit Listrik Gas Lirik

ID	T1 GT1	T1 GT2	T1 GT3	T1 GT4
Phase	3-Phase	3-Phase	3-Phase	3-Phase
MVA	5,000	5,000	5,000	6,000
Prim. kV	0,480	4,160	4,160	4,160
Sec. kV	13,800	13,800	13,800	13,800
% Z1	9,10	6,05	6,00	4,60
X1/R1	12,14	12,14	12,14	12,85
Tap Prim.	0	0	0	0
Tap Sec.	0	0	0	0
% Z	91,000	60,500	60,000	46,000
Winding	YNd	YNd	YNd	YNd
Phase Shift	-30	-30	-30	-30

Tabel 3.8 Data Transformator Ukui

ID	Trafo Pulai 1	Trafo Pulai 2	Trafo Pulai 3
Phase	3-Phase	3-Phase	3-Phase
MVA	2,000	2,000	0,200
Prim. kV	2,400	2,400	13,800
Sec. kV	13,800	13,800	0,380
% Z1	6,38	6,10	5,75
X1/R1	7,10	7,10	3,09
Tap Prim.	0	0	-2,500
Tap Sec.	0	0	0
% Z	63,800	61,000	57,500
Winding	Dyn	Dyn	Dyn
Phase Shift	30	30	30

Tabel 3.9 Data Transformator Tambahan

ID	Trafo Andan	Trafo Siemens	Trafo Union 1
Phase	3-Phase	3-Phase	3-Phase
MVA	2,000	2,000	2,000
Prim. kV	2,400	2,400	2,400
Sec. kV	13,800	13,800	13,800
% Z1	6,10	6,00	5,90
X1/R1	7,10	7,10	7,10
Prim.	0	0	0
Sec.	0	0	0
% Z	61,000	60,000	59,000
Winding	Dyn	YNd	YNd
Phase Shift	30	-30	-30

3.6 Data Governor

Tabel 3.10 Data Governor Generator Disel Lirik

Generator ID	DI 1	DI 2	DI 3	DI 4	DI 5
Mode	Isoch	Isoch	Isoch	Isoch	Isoch
Droop	0	0	0	0	0
ang. max	42	42	42	42	42
ang. min	0	0	0	0	0
Alpha	0,8273	0,8273	0,8273	0,8273	0,8273
Beta	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165
Rho	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
K1	271,6	271,6	271,6	271,6	271,6
Tau	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabel 3.10 Data Governor Generator Disel Lirik

Generator ID	DI 1	DI 2	DI 3	DI 4	DI 5
T1	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
T2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
LS GP	None	None	None	None	None
Pmax	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Pmin	0	0	0	0	0

Tabel 3.11 Data Governor Generator Gas Lirik

Generator ID	GAS T1	Gas T2	GAS T3	Gas T4
Mode	Droop	Droop	Droop	Droop
Droop	5	5	5	5
ang. max	42	42	42	42
ang. min	0	0	0	0
Alpha	0,8273	0,8273	0,8273	0,8273
Beta	0,165	0,165	0,165	0,165
Rho	0,2	0,2	0,2	0,2
K1	271,6	271,6	271,6	271,6
Tau	0,1	0,1	0,1	0,1
T1	0,025	0,025	0,025	0,025
T2	0,01	0,01	0,01	0,01
LS GP	None	None	None	None
Pmax	4,211	3,453	4,211	4,211
Pmin	0	0	0	0

Tabel 3.12 Data Governor Generator Gas Ukui

Generator ID	GTU 1	GT U 2	GTU3	GT U 4
Mode	Isoch	Isoch	Isoch	Isoch
Droop	0	0	0	0
ang. max	42	42	42	42
ang. min	0	0	0	0
Alpha	0,8273	0,8273	0,8273	0,8273
Beta	0,165	0,165	0,165	0,165
Rho	0,2	0,2	0,2	0,2
K1	271,6	271,6	271,6	271,6
Tau	0,1	0,1	0,1	0,1
T1	0,025	0,025	0,025	0,025
T2	0,01	0,01	0,01	0,01
LS GP	None	None	None	None
Pmax	0,6	0,6	0,6	0,6
Pmin	0	0	0	0

3.7 Perhitungan Jumlah PV

3.7.1 Jumlah PV untuk PLTS Lirik 750 kW

Modul PV yang digunakan berasal dari manufaktur Seraphim dengan tipe SRP 265-6PB yang mampu menghasilkan daya sebesar 265 Wp dengan tegangan 30 V. Untuk inverternya digunakan inverter Sunny Tripower Core 1 STP 50-40 dengan tegangan input 500 V-800 V (rating 670 V) dan mampu menghasilkan daya sebesar 50 kW. Modul inverter terdiri dari 6 MPPT dan tiap MPPT dapat digunakan untuk 2 rangkaian PV.

- Menentukan jumlah inverter

$$\text{Daya PLTS} = 750 \text{ kW}$$

$$\text{Daya Inverter} = 50 \text{ kW}$$

$$\text{Jumlah inverter} = \frac{\text{Daya PLTS}}{\text{Daya Inverter}} = \frac{750}{50} = 15 \text{ buah}$$

- b. Menentukan jumlah PV

$$\text{Tegangan input MPPT pada inverter} = 700 \text{ V}$$

$$\text{Tegangan output PV} = 30 \text{ V}$$

$$\text{Jumlah PV dalam 1 input MPPT} = \frac{700 \text{ V}}{30 \text{ V}} \cong 23 \text{ PV}$$

$$\text{Daya 1 PV} = 265 \text{ Wp}$$

$$\text{Daya 23 PV} = 23 \times 265 = 6095 \text{ Wp}$$

$$\text{Daya Input Inverter max} = 51000 \text{ W}$$

$$1 \text{ Inverter dapat diisi} = \frac{51000 \text{ W}}{6095 \text{ Wp}} \cong 8 \text{ rangkaian}$$

$$\text{Total PV dalam 1 Inverter} = 8 \times 23 = 184 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Daya untuk 1 Inverter} &= 184 \times 265 \text{ Wp} \\ &= 48760 \text{ Wp} \end{aligned}$$

Total Daya ini masih dibawah nilai Daya Input Inverter, akibatnya daya total seluruh sistem tidak akan mencapai daya yang diinginkan, sehingga daya total untuk 1 inverter perlu ditambah

$$\text{PV tambahan} = \frac{(50000 - 48760) \text{ Wp}}{265 \text{ Wp}} \cong 5$$

$$\text{Total PV 1 Inverter} = 184 + 5 = 189 \text{ buah}$$

$$\text{Total PV keseluruhan} = 189 \times 15 = 2835 \text{ buah}$$

$$\text{Total Daya PV} = 2835 \times 265 \text{ Wp} = 751,275 \text{ kWp}$$

3.7.2 Jumlah PV untuk PLTS Ukui 120 kW

Modul PV yang digunakan berasal dari manufaktur Seraphim dengan tipe SRP 265-6PB yang mampu menghasilkan daya sebesar 265

Wp dengan tegangan 30 V. Untuk inverternya digunakan inverter Sunny Tripower 25000TL-30 dengan tegangan input 390 V-800 V (rating 600 V) dan mampu menghasilkan daya sebesar 25 kW. Modul inverter terdiri dari 2 MPPT dan tiap MPPT dapat digunakan untuk 2 rangkaian PV.

- a. Menentukan jumlah inverter

$$\text{Daya PLTS} = 120 \text{ kW}$$

$$\text{Daya Inverter} = 25 \text{ kW}$$

$$\text{Jumlah inverter} = \frac{\text{Daya PLTS}}{\text{Daya Inverter}} = \frac{120}{25} \cong 5 \text{ buah}$$

- b. Menentukan jumlah PV

$$\text{Tegangan input MPPT pada inverter} = 700 \text{ V}$$

$$\text{Tegangan output PV} = 30 \text{ V}$$

$$\text{Jumlah PV dalam 1 input MPPT} = \frac{700 \text{ V}}{30 \text{ V}} \cong 23 \text{ PV}$$

$$\text{Daya 1 PV} = 265 \text{ Wp}$$

$$\text{Daya 23 PV} = 23 \times 265 = 6095 \text{ Wp}$$

$$\text{Daya Inverter} = 25000 \text{ W}$$

$$1 \text{ Inverter dapat diisi} = \frac{25000 \text{ W}}{6095 \text{ Wp}} \cong 4 \text{ rangkaian}$$

Dengan jumlah inverter sebanyak 5 buah, maka

$$\text{Total PV} = 5 \times 4 \times 23 = 460 \text{ buah}$$

3.8 Simulasi

Simulasi sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik dilakukan dengan *software* ETAP 12.6.0 untuk simulasi *load flow*, *short circuit*, koordinasi proteksi, dan stabilitas transien. Untuk mendapatkan potensi energi dari kedua PLTS, dilakukan simulasi dengan *software* Pvsyst

dengan jumlah PV serta spesifikasi sesuai dengan data subbab sebelumnya.

Simulasi *load flow* dilakukan dengan beberapa *case*, yaitu untuk konfigurasi lama dan konfigurasi baru dengan kondisi beban maksimum, dan rata-rata sesuai data beban Tabel 3.12. Simulasi *load flow* dilakukan dengan parameter *irradiance* 0, 250, 500, 750, dan 1000. Simulasi *load flow* digunakan untuk mendapatkan daya yang disuplai generator setelah PLTS tersambung.

Tabel 3.13 Beban Pertamina EP Ukui-Lirik

ID	Maksimum		Rata-rata		Minimum	
	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
Molek 01	419	314	419	314	419	314
Camp 01	255	191	255	191	255	191
WI 01	843	545	826	534	758	490
SB 01	1004	648	984	636	963	622.5
SK 01	542	350	542	350	542	350
Lirik 01	783	506	752	485	783	506
Andan 01	381	246	378	244	381	246
Pulai 01	718	539	718	539	718	539
Camp Ukui	120	90	120	90	120	90

Simulasi *short circuit* dilakukan untuk menentukan kapasitas peralatan yang akan dipasang pada sistem PLTS. Simulasi *short circuit* untuk menentukan kapasitas peralatan dilakukan pada sistem dengan konfigurasi lama karena pada konfigurasi ini terdapat tiga generator yang bekerja pada bus interkoneksi PLTS Lirik sehingga nilai arus hubung singkat akan lebih besar. Nilai arus hubung singkat yang dicari untuk menentukan kapasitas peralatan adalah nilai *Symmetrical RMS* dan arus puncak atau *peak current*. Selain itu, simulasi *short circuit* juga digunakan untuk menentukan koordinasi proteksi. Untuk koordinasi proteksi, arus hubung singkat yang dicari adalah arus hubung singkat minimum (30 *cycle*). Koordinasi proteksi hanya dilakukan pada peralatan pengaman yang ada pada sistem PLTS.

Simulasi stabilitas transien dilakukan untuk kasus PLTS lepas dari sistem. Pada analisis ini akan diamati tegangan dan frekuensi pada bus interkoneksi dengan PLTS ketika PLTS lepas dari sistem. Simulasi dilakukan baik untuk konfigurasi lama maupun konfigurasi baru.

Untuk simulasi PVsyst, selain membutuhkan data jumlah PV, data lain yang diperlukan adalah data radiasi matahari. Data ini bisa didapat dengan memasukkan koordinat lokasi pemasangan PLTS. Koordinat untuk PLTS Lirik adalah $0,31^{\circ}$ Lintang Selatan, $102,3^{\circ}$ Bujur Timur. Untuk koordinat PLTS Ukui adalah $0,22^{\circ}$ Lintang Selatan, $101,98^{\circ}$ Bujur Timur. Dari simulasi PVsyst akan didapat potensi energi yang mampu dihasilkan PLTS. Nilai potensi energi selanjutnya akan digunakan untuk menentukan biaya pembangkitan beserta biaya penghematan setelah pemasangan PLTS.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi yang telah dilakukan dengan data-data yang ada pada Bab 3. Simulasi sistem kelistrikan Pertamina EP Ukui-Lirik dilakukan dengan *software* ETAP 12.6.0. Untuk mendapatkan potensi energi dari kedua PLTS, dilakukan simulasi dengan *software* PVsyst dengan jumlah PV serta spesifikasi sesuai dengan data yang ada pada Bab 3.

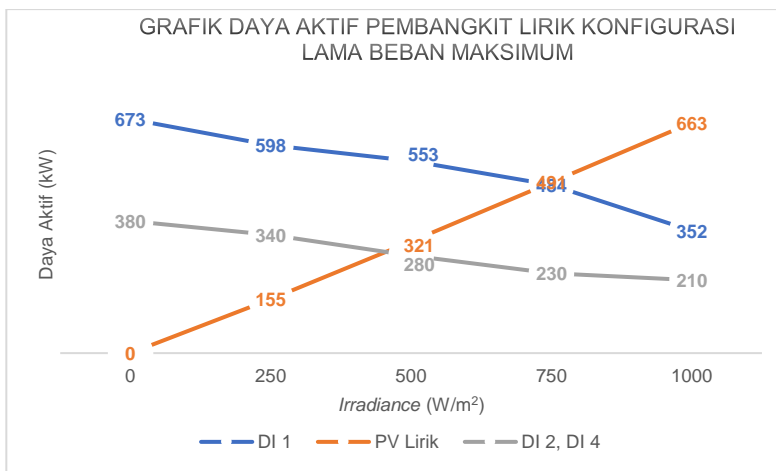
4.1 Analisis Aliran Daya (Load Flow)

Pada analisis ini dilakukan pengamatan pada perubahan nilai daya yang disuplai generator beserta faktor dayanya. Faktor daya pada PLTS Lirik diatur pada nilai 82% sedangkan faktor daya PLTS Ukui diatur pada nilai 100%. Sistem kelistrikan *site* Lirik berpembangkit tenaga disel mempunyai dua konfigurasi, yaitu konfigurasi lama dan konfigurasi baru.

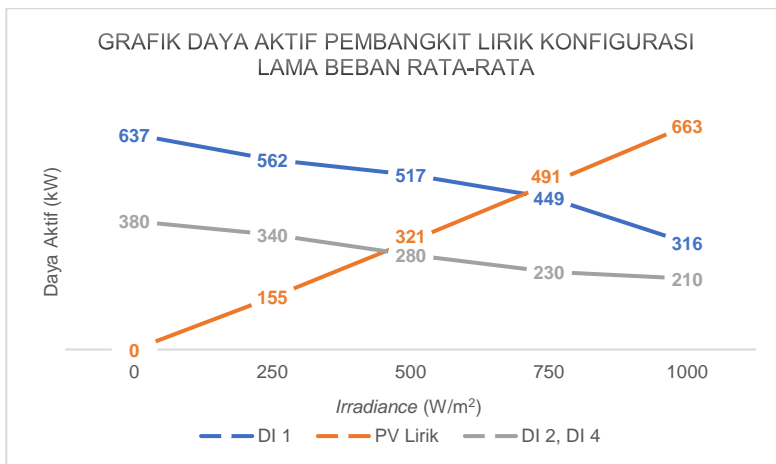
4.1.1 Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama

Pada konfigurasi lama terdapat dua kondisi pembebanan, yaitu beban maksimal sebesar 1419 kW, 943 kVAR dan beban rata-rata 1385 kW, 920 kVAR. Terdapat tiga generator disel yang aktif untuk menyuplai beban tersebut, yaitu DI 1 800 kW serta DI 2 dan DI 4 masing-masing berkapasitas 500 kW. Sebelum pemasangan PLTS, DI 1 mampu menyuplai daya sebesar 673 kW dengan faktor daya sebesar 80,3% sedangkan DI 2 dan DI 4 masing-masing menyuplai daya sebesar 380 kW dengan faktor daya sebesar 84,5% pada saat beban maksimum. Pada saat beban rata-rata, sebelum pemasangan PLTS DI 1 mampu menyuplai daya sebesar 637 kW dengan faktor daya 80,2% sedangkan DI 2 dan DI 4 masing-masing menyuplai daya sebesar 380 kW dengan faktor daya 84,5%.

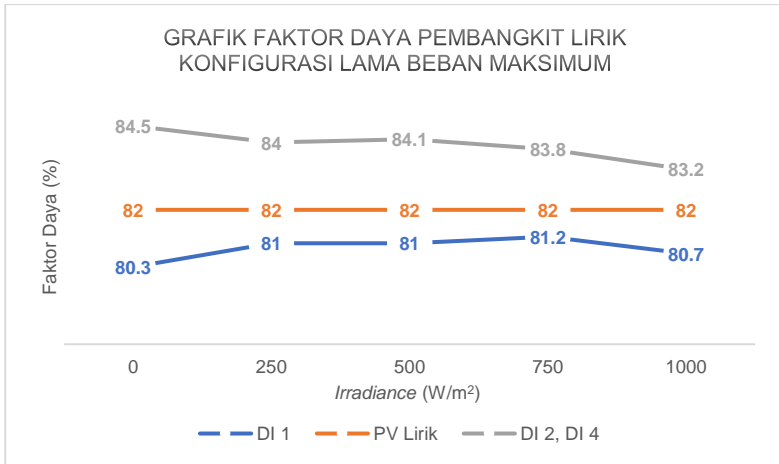
Selanjutnya, akan diamati perubahan daya dan faktor daya dari generator yang bekerja setelah dilakukan pemasangan PLTS 750 kW pada *site* Lirik. Berikut adalah hasil dari simulasi yang telah dilakukan.



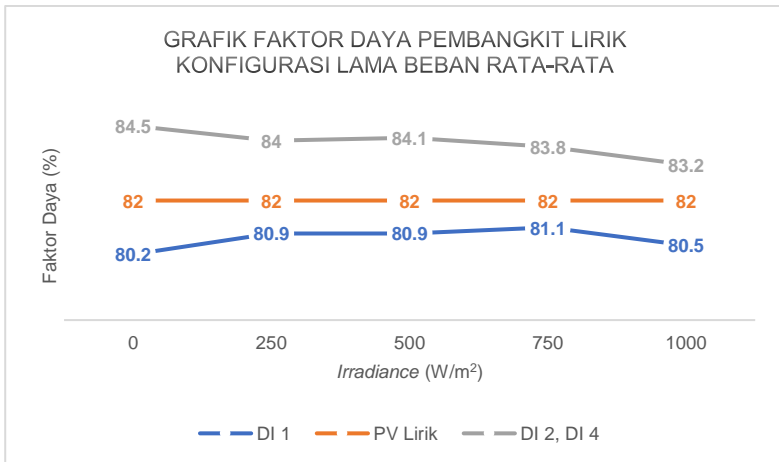
Gambar 4.1 Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Maksimum



Gambar 4.2 Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Rata-Rata



Gambar 4.3 Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Maksimum



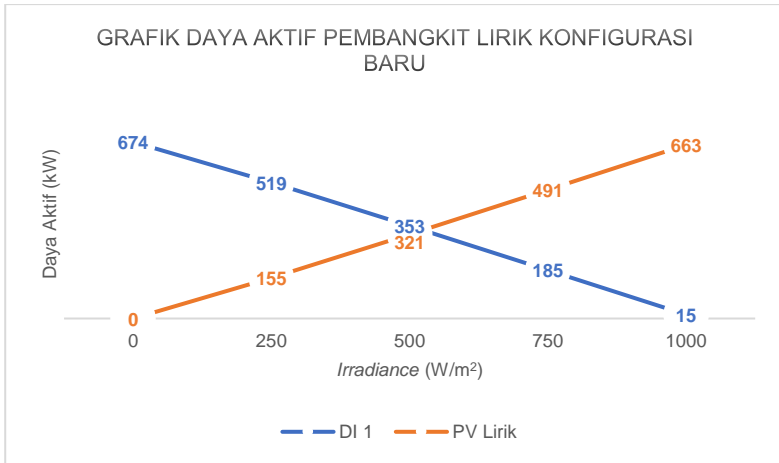
Gambar 4.4 Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Lama Beban Rata-Rata

Dari hasil simulasi, daya aktif PLTS mengalami kenaikan saat nilai *irradiance* naik. Kenaikan daya aktif PLTS menyebabkan daya generator mengalami penurunan. Dari grafik faktor daya, terlihat bahwa faktor daya generator DI 1 cenderung stabil. Hal ini terjadi karena selain PLTS menyuplai aktif, PLTS juga menyuplai daya reaktif yang juga mengalami kenaikan seiring naiknya *irradiance*. Pengaruh pembebanan yang bervariasi juga tidak terlalu berpengaruh pada aliran daya sistem karena variasi pembebanan yang ada pada sistem ini tidak terlalu besar *range*-nya.

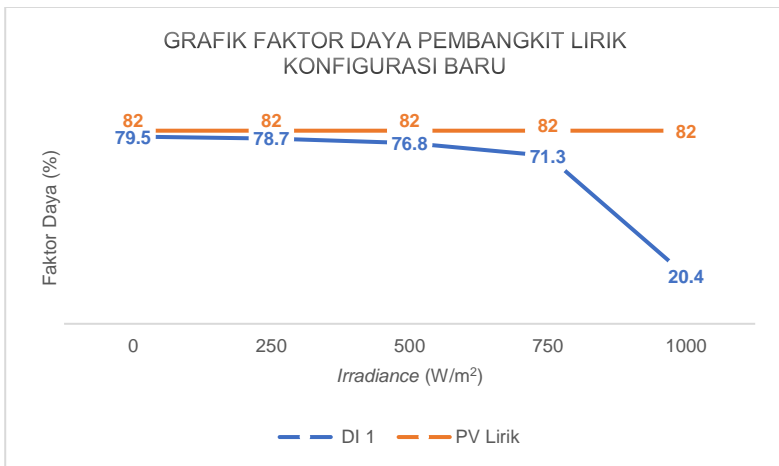
4.1.2 Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru

Pada konfigurasi baru beban yang harus disuplai pembangkit sebesar 674 kW, 505 kVAR. Beban ini disuplai oleh dua pembangkit, yaitu DI 1 sebesar 800 kW serta DI 2 yang berkapasitas 500 kW. Sebelum pemasangan PLTS, DI 1 menyuplai daya sebesar 474 kW dengan faktor daya sebesar 79,3% sedangkan DI 2 menyuplai daya sebesar 200 kW dengan faktor daya sebesar 80%. Ketika PLTS dipasang, pada nilai *irradiance* 750 W/m², generator DI 1 mulai mengalami *reverse power* sehingga pada simulasi ini, generator DI 2 dimatikan. Dengan dimatikannya generator DI 2, sebelum adanya pemasangan PLTS, generator DI 1 masih mampu menyuplai seluruh beban. Lalu, dengan adanya pemasangan PLTS, akan dilakukan analisis perubahan suplai daya yang diberikan oleh generator DI 1.

Berdasarkan hasil simulasi, daya pembangkit akan turun seiring dengan naiknya daya PLTS akibat kenaikan nilai *irradiance*. Ketika nilai *irradiance* mencapai 1000 W/m², daya yang disuplai generator DI 1 sangatlah kecil yaitu sebesar 15 kW. Padahal kapasitas generator ini mencapai 800 kW. Pengoperasian generator kapasitas besar untuk menyuplai daya yang sangat kecil menyebabkan pemasangan PLTS pada sistem ini tidak layak. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa faktor daya generator mengalami sedikit sekali penurunan sampai pada nilai *irradiance* 750 W/m². Setelah itu nilai faktor daya generator turun drastis. Turunnya faktor daya generator ini diakibatkan oleh rendahnya daya aktif yang disuplai oleh generator karena sebagian besar daya aktif sudah disuplai oleh PLTS.



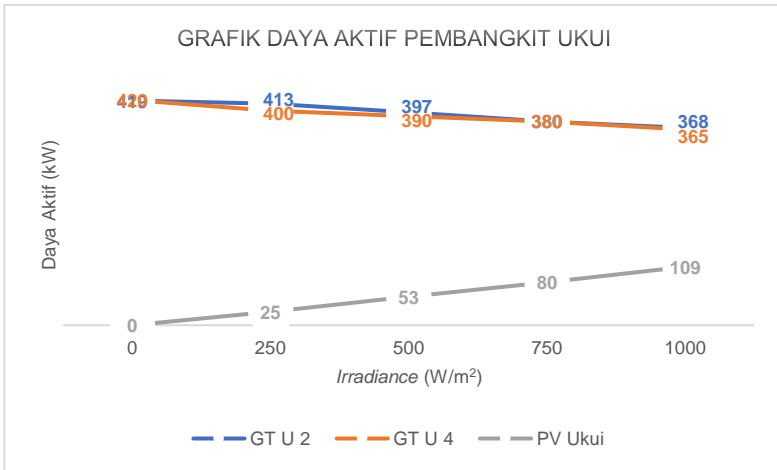
Gambar 4.5 Grafik Daya Aktif Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru



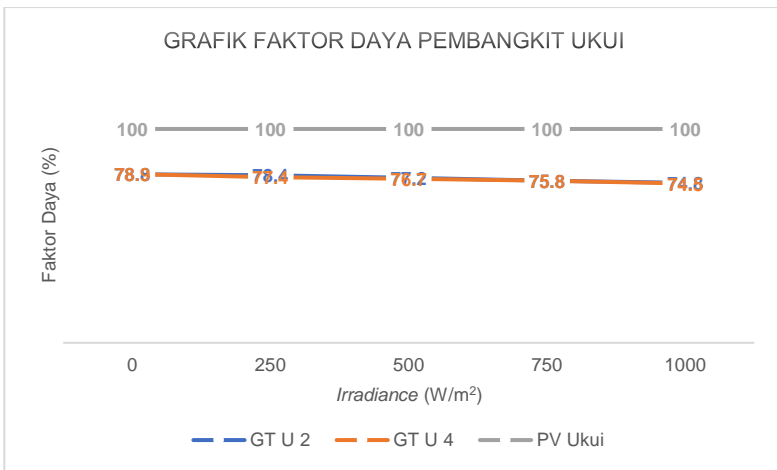
Gambar 4.6 Grafik Faktor Daya Pembangkit Lirik Konfigurasi Baru

4.1.3 Daya Aktif Pembangkit Ukui

Untuk sistem kelistrikan *site* Ukui, hanya terdapat satu konfigurasi dengan total beban yang harus disuplai sebesar 838 kW, 505 kVAR.



Gambar 4.7 Grafik Daya Aktif Pembangkit Ukui



Gambar 4.8 Grafik Faktor Daya Pembangkit Ukui

Dari hasil simulasi, ketika daya PLTS Ukui naik akibat kenaikan *irradiance*, daya generator mengalami penurunan. Faktor daya generator juga mengalami penurunan karena PLTS Ukui hanya menyuplai daya aktif saja. Penurunan faktor daya generator tidak terlalu signifikan sehingga secara umum sistem ini masih layak untuk dioperasikan.

4.2 Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat dilakukan untuk menentukan rating peralatan yang harus dipasang. Arus hubung singkat yang diamati untuk menentukan rating peralatan adalah arus puncak atau *peak current* dan *Symmetrical RMS*. Simulasi ini dilakukan pada bus interkoneksi dengan PLTS pada konfigurasi lama.

4.2.1 Rating Peralatan *Breaker* PLTS Lirik

Peralatan yang dipasang harus mempunyai rating di atas arus yang tercantum pada data Tabel 4.1. Rating peralatan yang dipasang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Arus Hubung Singkat Bus Interkoneksi PLTS Lirik

Bus ID	Bus PLTD Lirik 2,4 kV	Bus PV Panel PVA 1 0,38 kV
<i>Symmetrical RMS</i>	3,278 kA	18,477 kA
<i>Peak Current</i>	12,689 kA	45,752 kA
<i>Continuous Current</i>	195,5 A	1234,9A

Tabel 4.2 Rating Peralatan PLTS Lirik

Bus ID	Bus PLTD Lirik 2,4 kV	Bus PV Panel PVA 1 0,38 kV
<i>Breaking</i>	6,3 kA	25 kA
<i>Making Peak</i>	16 kA	60 kA
<i>Continuous Current</i>	225 A	1600 A

4.2.2 Rating Peralatan *Breaker* PLTS Ukui

Peralatan yang dipasang harus mempunyai rating diatas arus yang tercantum pada data Tabel 4.3. Rating peralatan yang dipasang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Arus Hubung Singkat Bus Interkoneksi PLTS Ukui

Bus ID	Bus Pulai 0,38 kV	Bus PV Panel PVA 4 0,38 kV
<i>Symmetrical RMS</i>	4,463 kA	2,994 kA
<i>Peak Current</i>	9,352 kA	4,824 kA
<i>Continuous Current</i>	162,2 A	162,2 A

Tabel 4.4 Rating Peralatan PLTS Ukui

Bus ID	Bus Pulai 0,38 kV	Bus PV Panel PVA 4 0,38 kV
<i>Breaking</i>	6,25 kA	5 kA
<i>Making Peak</i>	16 kA	6,615 kA
<i>Rated Amp</i>	250A	200 A

4.2.3 Arus Hubung Singkat Tiap Bus

Selain untuk menentukan rating peralatan, arus hubung singkat juga diperlukan untuk melakukan koordinasi proteksi. Arus yang perlu diperhatikan untuk melakukan koordinasi proteksi adalah arus hubung singkat minimum tiap bus. Pada Tabel 4.5 akan ditampilkan nilai arus hubung singkat saat 0.5 *cycle* dan 30 *cycle*. Simulasi hubung singkat ini dilakukan pada sistem konfigurasi lama.

Tabel 4.5 Arus Hubung Singkat Sistem Konfigurasi Lama

Bus ID	0.5 cycle (kA)		30 cycle (kA)	
	3 Fasa	L-L	3 Fasa	L-L
Bus UKUI	3,389	2,988	1,617	1,702
Bus 1 PLTG LIRIK	1,923	1,688	0,864	0,889
Bus Andan	0,393	0,340	0,233	0,224
Bus Camp	0,778	0,682	0,300	0,309
BUS DI1	4,641	4,084	1,933	2,034
BUS DI2	4,630	4,074	1,930	2,030
BUS DI3	4,611	4,057	1,924	2,023
BUS DI4	4,630	4,074	1,930	2,030
BUS DI5	4,611	4,057	1,924	2,023
Bus Molek	1,609	1,400	0,811	0,816
Bus P1	0,510	0,446	0,230	0,233
Bus PLTD LIRIK	4,669	4,110	1,934	2,035

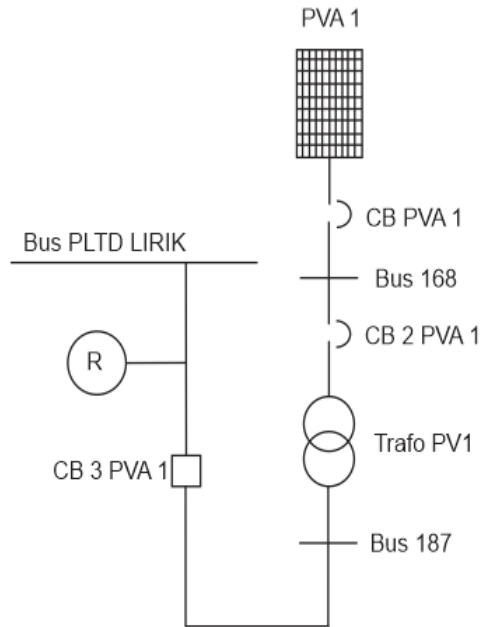
Tabel 4.5 Arus Hubung Singkat Sistem Konfigurasi Lama

Bus ID	0.5 cycle (kA)		30 cycle (kA)	
	3 Fasa	L-L	3 Fasa	L-L
Bus PLTD LIRIK 2	0,779	0,683	0,300	0,309
Bus Pulai 1	0,511	0,448	0,232	0,235
Bus Pulai 2	0,417	0,366	0,234	0,237
Bus Pulai 13,8 kV	0,412	0,361	0,232	0,235
Bus Pulai 380 V	4,195	3,642	3,219	2,953
BUS SB	1,919	1,685	0,863	0,887
BUS SK 1	1,918	1,684	0,863	0,887
Bus WI 01	1,919	1,684	0,863	0,887
Bus 2 PLTG Lirik	1,923	1,688	0,864	0,889
Bus 156	2,726	2,363	2,317	2,079
Bus 157	1,618	1,408	0,812	0,818
Bus 187	4,400	3,867	1,889	1,977
Bus 168	18,256	15,898	9,760	9,834
GT 1	30.104	26,266	18,056	17,664
GT 2	5,793	5,097	2,999	3,117
GT 3	4,111	3,592	2,297	2,278
GT 4	5,657	4,969	2,831	2,916
Node Interkoneksi	0,769	0,672	0,294	0,301

4.3 Koordinasi Proteksi PLTS

Simulasi koordinasi proteksi hanya dilakukan pada peralatan pengaman PLTS. Sesuai pada sub bab 4.2, data yang digunakan untuk melakukan koordinasi proteksi diambil dari sistem yang berjalan pada konfigurasi lama. Konfigurasi ini dipilih karena berdasarkan simulasi aliran daya, sistem kelistrikan konfigurasi lama lebih layak untuk dioperasikan daripada sistem kelistrikan konfigurasi baru setelah adanya pemasangan PLTS. Gambar 4.9 menunjukkan gambar PLTS Lirik. Simulasi koordinasi proteksi dilakukan untuk CB PVA 1, CB 2 PVA 1, dan Rele R.

4.3.1 Koordinasi Proteksi PLTS Lirik



Gambar 4.9 Diagram Segaris PLTS Lirik

Perhitungan *setting* untuk ketiga peralatan pengaman di atas adalah sebagai berikut:

a. Rele R

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam
Kurva : Very Inverse
CT ratio : 500/5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ Trafo PV1} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ Trafo PV1}$$

$$1,05 \times 481,1 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1,4 \times 481,1 \text{ A}$$

$$505,15 \text{ A} \leq I_{set} \leq 673,54 \text{ A}$$

$$I_{set} = 500 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{prim}} = \frac{500}{500} = 1$$

Time Dial

Pilih waktu operasi (t_d) = 0,1 s

$$t_d = \frac{13,5}{\left(\left(\frac{I}{I_{set}}\right) - 1\right)} \times \frac{T}{2,97}$$

$$T = \frac{t_d \times 2,97 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max bus 187}}{I_{set}}\right) - 1\right)}{13,5}$$

$$T = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left(\left(\frac{4369}{500}\right) - 1\right)}{13,5}$$

$T = 0,17$ (dipilih *time dial* = 0,25)

Instantaneous Pickup

$1,6 \times FLA \text{ Trafo} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min bus 187}$

$1,6 \times 481,1 \text{ A} \leq I_{set} \leq 0,8 \times 1977 \text{ A}$

$769,76 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1581,6 \text{ A}$

$I_{set} = 1100 \text{ A}$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{prim}} = \frac{1100}{500} = 2,2$$

Delay = 0,1 s

b. LVCB 2 PVA 1

Manufacturer : Square-D

Model : NW16H1

Low Set

$1,05 \times FLA \text{ saluran PLTS} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ saluran PLTS}$

$1,05 \times 1367 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1367 \text{ A}$

$1435,4 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1913,8 \text{ A}$

$I_{set} = 1600 \text{ A}$

LT band = 0,5

High Set

$1,6 \times FLA \text{ saluran PLTS} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min bus 168}$

$1,6 \times 1367 \text{ A} \leq I_{set} \leq 0,8 \times 9834 \text{ A}$

$$2187,2 A \leq I_{set} \leq 7867,2 A$$

$$I_{set} = 4000 A$$

$$ST\ band = 0,3$$

c. LVCB 2 PVA 1

Manufacturer : Square-D

Model : NW16H1

Low Set

$$1,05 \times FLA\ saluran\ PLTS \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA\ saluran\ PLTS$$

$$1,05 \times 1367 A \leq I_{set} \leq 1,4 \times 1367 A$$

$$1435.4 A \leq I_{set} \leq 1913,8 A$$

$$I_{set} = 1600 A$$

$$LT\ band = 0,5$$

High Set

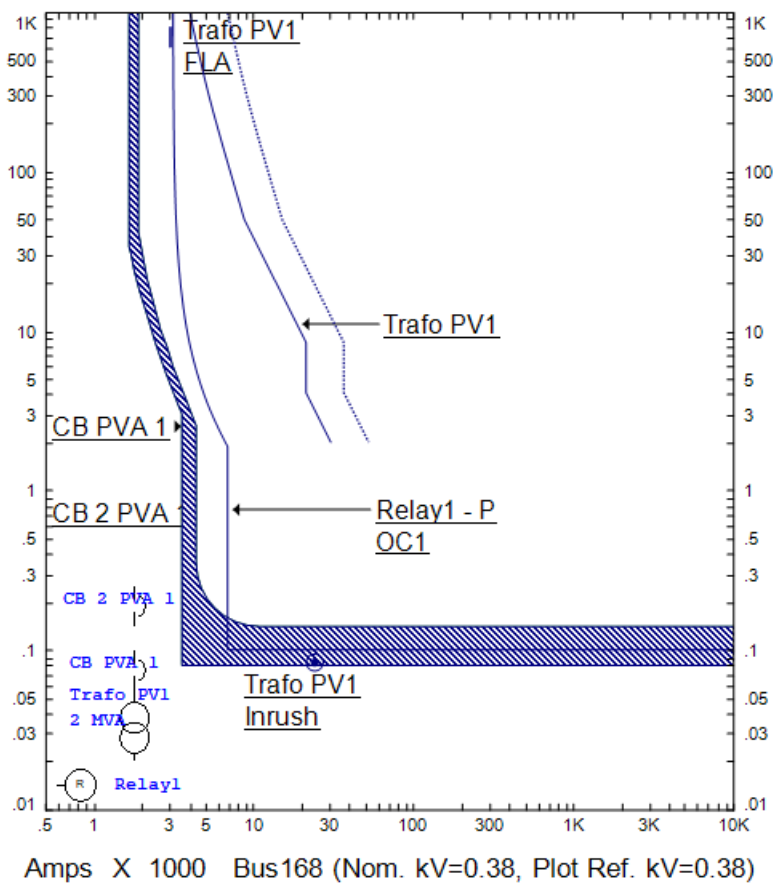
$$1,6 \times FLA\ saluran\ PLTS \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc\ min\ bus\ 168}$$

$$1,6 \times 1367 A \leq I_{set} \leq 0,8 \times 9834 A$$

$$2187,2 A \leq I_{set} \leq 7867,2 A$$

$$I_{set} = 4000 A$$

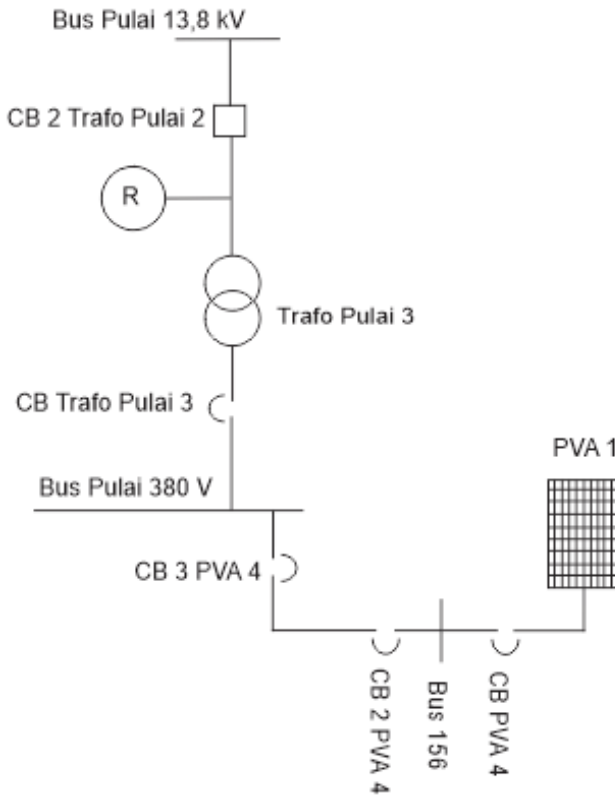
$$ST\ band = 0,3$$



Gambar 4.10 Kurva Koordinasi Peralatan Proteksi PLTS Lirik

4.3.2 Koordinasi Proteksi PLTS Ukui

Gambar 4.11 menunjukkan gambar PLTS Ukui. Simulasi koordinasi proteksi dilakukan untuk CB PVA 4, CB 2 PVA 4, CB 3 PVA 4.



Gambar 4.11 Diagram Segaris PLTS Ukui

Perhitungan *setting* untuk peralatan pengaman di atas adalah sebagai berikut:

a. LVCB 3 PVA 4

Manufacturer : Square-D
Model : NT08H1
Sensor ID : 250 A

Low Set

$$1,05 \times FLA \text{ saluran PLTS} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ saluran PLTS}$$

$$1,05 \times 205 A \leq I_{set} \leq 1,4 \times 205 A$$

$$215 A \leq I_{set} \leq 287 A$$

$$I_{set} = 250 A$$

$$LT \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor ID} = \frac{250}{250} = 1$$

$$LT \text{ band} = 0,5$$

High Set

$$1,6 \times FLA \text{ PLTS} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ min bus Pulai 380}}$$

$$1,6 \times 205 A \leq I_{set} \leq 0,8 \times 2953 A$$

$$328 A \leq I_{set} \leq 2362,4 A$$

$$I_{set} = 1500 A$$

$$I_{set} = 1500 A \times LT \text{ Pickup} = 1500 \times 1 = 1500$$

$$ST \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor ID} = \frac{1500}{250} = 6$$

$$ST \text{ band} = 0,1$$

b. LVCB 2 PVA 4

Manufacturer : Square-D
Model : NT08H1
Sensor ID : 250 A

$$1,05 \times FLA \text{ saluran PLTS} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ saluran PLTS}$$

$$1,05 \times 205 A \leq I_{set} \leq 1,4 \times 205 A$$

$$215 A \leq I_{set} \leq 287 A$$

$$I_{set} = 250 A$$

$$LT \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor ID} = \frac{250}{250} = 1$$

$$LT \text{ band} = 0,5$$

High Set

$$1,6 \times FLA \text{ PLTS} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ min bus } 156$$

$$1,6 \times 205 \text{ A} \leq I_{set} \leq 0,8 \times 2079 \text{ A}$$

$$328 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1663,2 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1500 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1500 \text{ A} \times LT \text{ Pickup} = 1500 \times 1 = 1500$$

$$ST \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor \text{ ID}} = \frac{1500}{250} = 6$$

$$ST \text{ band} = 0,1$$

c. LVCB PVA 4

Manufacturer : Square-D

Model : NT08H1

Sensor ID : 250 A

$$1,05 \times FLA \text{ saluran PLTS} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ saluran PLTS}$$

$$1,05 \times 205 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1,4 \times 205 \text{ A}$$

$$215 \text{ A} \leq I_{set} \leq 287 \text{ A}$$

$$I_{set} = 250 \text{ A}$$

$$LT \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor \text{ ID}} = \frac{250}{250} = 1$$

$$LT \text{ band} = 0,5$$

High Set

$$1,6 \times FLA \text{ PLTS} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ min bus } 156$$

$$1,6 \times 205 \text{ A} \leq I_{set} \leq 0,8 \times 2079 \text{ A}$$

$$328 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1663,2 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1500 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1500 \text{ A} \times LT \text{ Pickup} = 1500 \times 1 = 1500$$

$$ST \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor \text{ ID}} = \frac{1500}{250} = 6$$

$$ST \text{ band} = 0,1$$

d. LVCB Trafo Pulau 3

Manufacturer : Square-D

Model : NW08H1

Sensor ID : 400 A

$$1,05 \times FLA \text{ Trafo Pulai 3} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ Trafo Pulai 3}$$

$$1,05 \times 303 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1,4 \times 303 \text{ A}$$

$$318 \text{ A} \leq I_{set} \leq 424 \text{ A}$$

$$I_{set} = 400 \text{ A}$$

$$LT \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor \text{ ID}} = \frac{400}{400} = 1$$

$$LT \text{ band} = 0,5$$

High Set

$$1,6 \times FLA \text{ trafo Pulai 3} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ min bus Pulai 380 V}}$$

$$1,6 \times 205 \text{ A} \leq I_{set} \leq 0,8 \times 3018 \text{ A}$$

$$484 \text{ A} \leq I_{set} \leq 2414 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1600 \text{ A}$$

$$I_{set} = 1600 \text{ A} \times LT \text{ Pickup} = 1600 \times 1 = 1600$$

$$ST \text{ Pickup} = \frac{I_{set}}{Sensor \text{ ID}} = \frac{1600}{400} = 4$$

$$ST \text{ band} = 0,3$$

e. Rele R

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam

Kurva : *Very Inverse*

CT ratio : 50/5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times FLA \text{ Trafo Pulai 3} \leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \text{ Trafo Pulai 3}$$

$$1,05 \times 8,36 \text{ A} \leq I_{set} \leq 1,4 \times 8,36 \text{ A}$$

$$8,78 \text{ A} \leq I_{set} \leq 11,7 \text{ A}$$

$$I_{set} = 11,5 \text{ A}$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT \text{ prim}} = \frac{11,5}{50} = 0,23$$

Time Dial

Pilih waktu operasi (t_d) = 0,1 s

$$t_d = \frac{13,5}{\left(\left(\frac{I}{I_{set}}\right) - 1\right)} \times \frac{T}{2,97}$$

$$T = \frac{t_d \times 2,97 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max bus Pulai 13,8}}{I_{set}} \right) - 1 \right)}{13,5}$$

$$T = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left(\left(\frac{412}{11,5} \right) - 1 \right)}{13,5}$$

$$T = 0,77 \text{ (dipilih } time \text{ dial} = 1,1)$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \text{ Trafo Pulai 3} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \min bus Pulai 13,8}$$

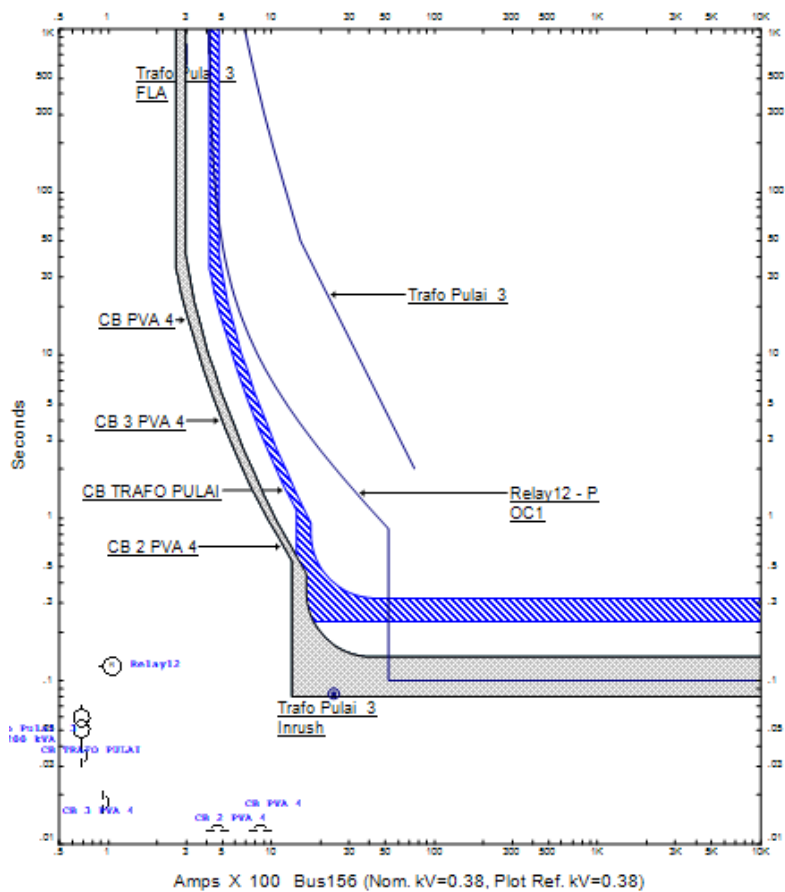
$$1,6 \times 8,36 A \leq I_{set} \leq 0,8 \times 235 A$$

$$13,38 A \leq I_{set} \leq 188 A$$

$$I_{set} = 145 A$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{prim}} = \frac{145}{50} = 2,9$$

$$Delay = 0,1 \text{ s}$$



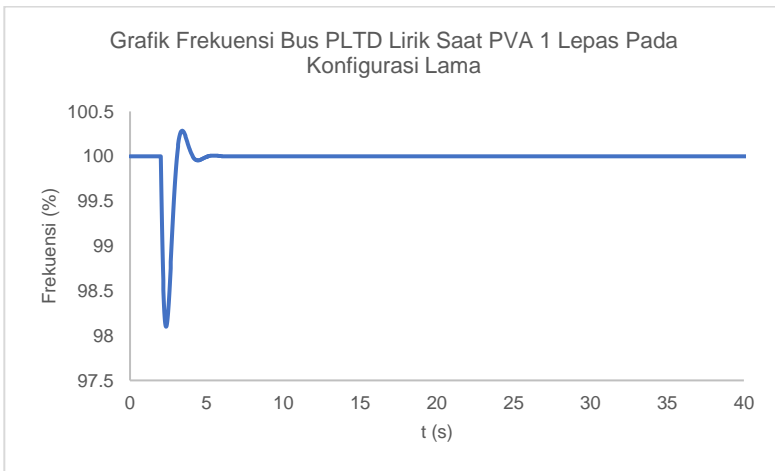
Gambar 4.12 Kurva Koordinasi Peralatan Proteksi PLTS Ukui

4.4 Analisis Stabilitas Transien

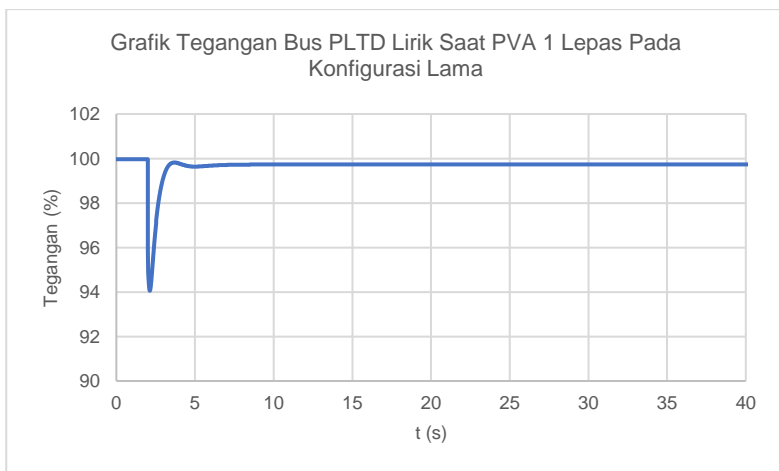
Pada sub bab ini, akan dibahas hasil simulasi stabilitas transien yang telah disimulasikan dengan ETAP 12.6.0. Hasil yang akan ditunjukkan pada pembahasan ini adalah respon frekuensi dan tegangan sistem saat terjadi gangguan setelah adanya pemasangan PLTS. Simulasi dilakukan sesuai dengan *case* yang telah dijelaskan pada Bab 3.

4.4.1 Stabilitas Transien Sistem Lirik Konfigurasi Lama

Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan grafik respon frekuensi dan tegangan pada Bus PLTD Lirik setelah PLTS lepas dari sistem. Dari Gambar 4.13, terlihat bahwa frekuensi sistem dapat kembali stabil dengan nilai 100% setelah PLTS Lirik lepas dari sistem. Sedangkan pada Gambar 4.14, tampak bahwa tegangan pada Bus PLTD Lirik mengalami sedikit penurunan dari 99,96% menjadi 99,73%. Baik dari frekuensi maupun tegangan, sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.13 Respon Frekuensi Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Lama



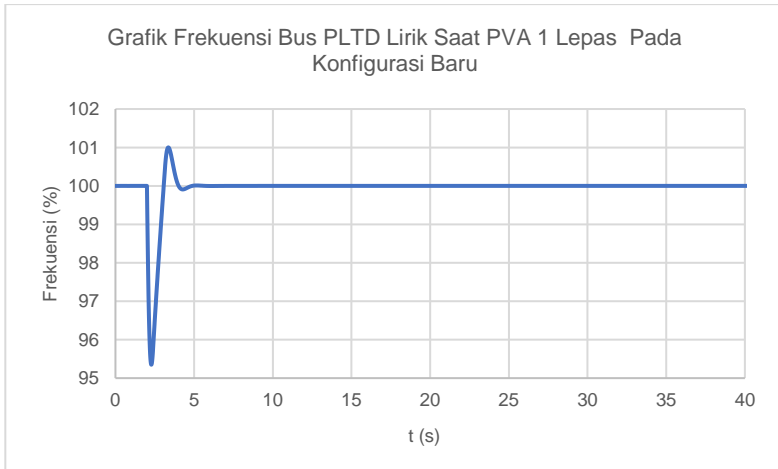
Gambar 4.14 Respon Tegangan Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Lama

Tabel 4.6 Hasil Simulasi Transien PLTS Lirik Lepas Konfigurasi Lama

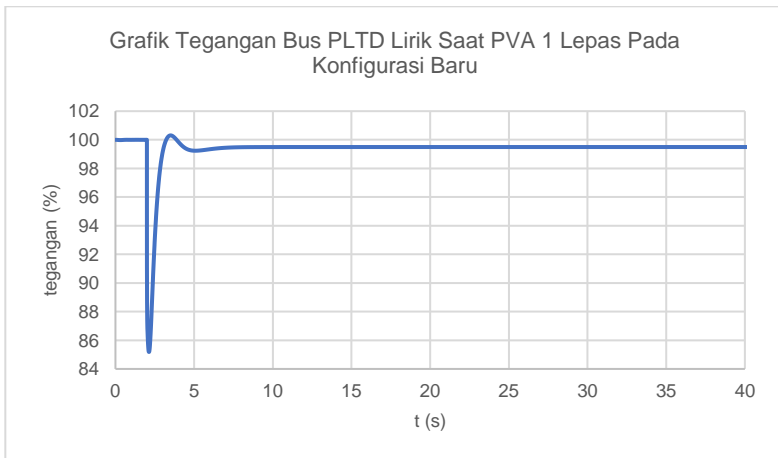
Kasus	Bus ID	Frek. Min	Frek. Steady	V min	V steady	Ket	
						f	V
PLTS Lirik Lepas Konfig. Lama	Bus PLTD Lirik	98,09%	100%	94,05%	99,73%	√	√

4.4.2 Stabilitas Transien Sistem Lirik Konfigurasi Baru

Pada konfigurasi baru, respon frekuensi setelah lepasnya PLTS ditunjukkan pada Gambar 4.21. Dari gambar tersebut dapat dilihat jika frekuensi sistem kembali stabil dengan nilai 100%. Grafik respon tegangan Bus PLTD Lirik setelah PLTS lepas ditunjukkan pada Gambar 4.22. Grafik respon tegangan juga menunjukkan sistem masih stabil walaupun PLTS lepas dari sistem. Nilai tegangan mengalami penurunan yang sedikit sekali, yaitu dari 99,9% menjadi 99,49%.



Gambar 4.15 Respon Frekuensi Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Baru



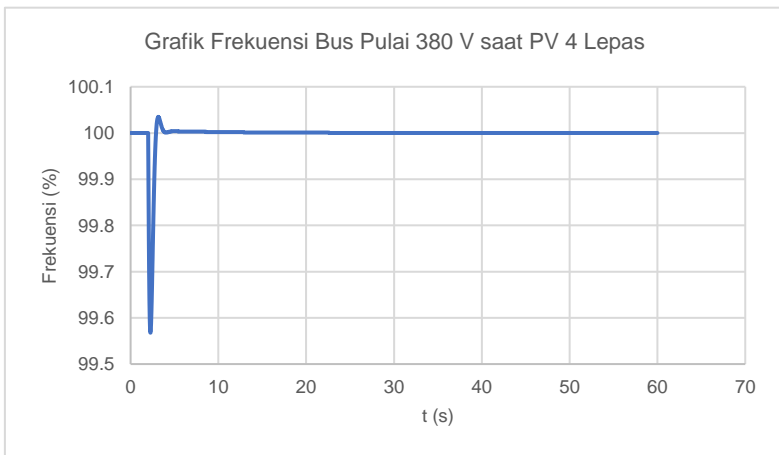
Gambar 4.16 Respon Tegangan Pada Bus PLTD Lirik Setelah PLTS Lirik Lepas Dari Sistem Konfigurasi Baru

Tabel 4.7 Hasil Simulasi Transien PLTS Lirik Lepas Konfigurasi Baru

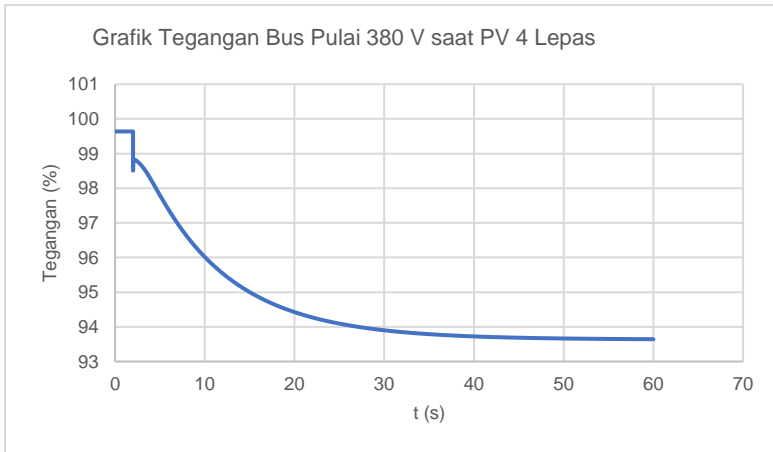
Kasus	Bus ID	Frek. Min	Frek. <i>Steady</i>	V min	V <i>steady</i>	Ket	
						f	V
PLTS Lirik Lepas Konfig. Baru	Bus PLTD Lirik	95,34%	100%	85,19%	99,49%	√	√

4.4.3 Stabilitas Transien Sistem Ukui

Pada sistem Ukui, respon frekuensi pada Bus Pulai 380 V menunjukkan bahwa sistem masih stabil dengan dengan kondisi *steady state* bernilai 100%. Untuk respon tegangan, terlihat bahwa tegangan pada Bus Pulai 380 V mengalami penurunan yang cukup drastis. Tegangan Bus Pulai 380 V turun hingga mencapai 93,63%. Walaupun turun cukup jauh, tetapi nilai tegangan bus ini masih berada dalam batas yang diperbolehkan.



Gambar 4.17 Respon Frekuensi Pada Bus Pulai 380 V Setelah PLTS Ukui Lepas Dari Sistem



Gambar 4.18 Respon Tegangan Pada Bus Pulai 380 V Setelah PLTS Ukui Lepas Dari Sistem

Tabel 4.8 Hasil Simulasi Transien PLTS Ukui Lepas

Kasus	Bus ID	Frek. Min	Frek. Steady	V min	V steady	Ket f V	
PLTS Ukui Lepas	Bus Pulai 380 V	99,56%	100%	93,63%	93,63%	√	√

4.5 Analisis Ekonomi Pemasangan PLTS Lirik-Ukui

4.5.1 Potensi Energi PLTS Lirik

Pada simulasi PVsyst, data awal yang diperlukan sebelum menjalankan simulasi adalah sudut kemiringan PV, merk dan model PV yang digunakan, merk dan model inverter yang digunakan, serta jumlah PV yang digunakan. Merk, model serta jumlah PV dan jumlah inverter yang digunakan telah dibahas pada bab 3. Sudut kemiringan PV ditentukan sebesar 5° menghadap ke utara karena lokasi pemasangan PV berada pada belahan bumi selatan.

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan PVsyst, diperoleh energi pertahun sebesar 966,8 MWh untuk PLTS Lirik.

Sedangkan energi yang dihasilkan oleh PLTS Ukui selama setahun adalah sekitar 157,8 MWh.

a. Potensi Energi PLTS Lirik

$$\text{Daya 1 PV} = 265 \text{ Wp}$$

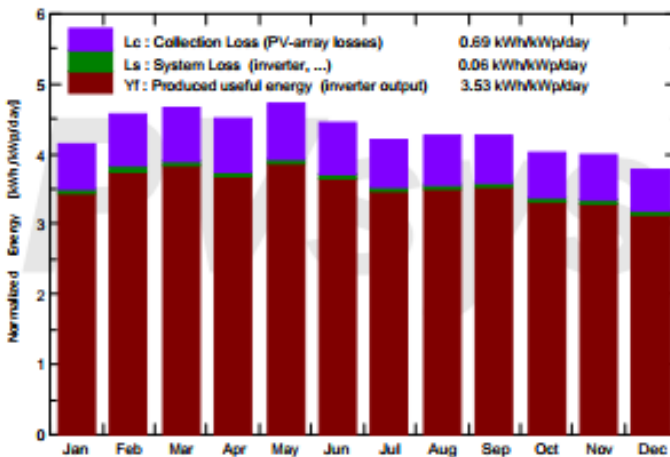
$$\text{Daya 2829 PV} = 2829 \times 265 = 749685 \text{ Wp}$$

$$\text{Energi bersih perhari} = 3,53 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} / \text{hari}$$

$$\text{Energi bersih pertahun} = 3,53 \times 365 = 1288 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} / \text{tahun}$$

$$\text{Energi total} = 1288 \times 749,685 = 966,8 \text{ MWh/th}$$

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 750 kWp



Gambar 4.19 Rata-Rata Energi Harian yang Dihasilkan PLTS Lirik

b. Potensi Energi PLTS Lirik

$$\text{Daya 1 PV} = 265 \text{ Wp}$$

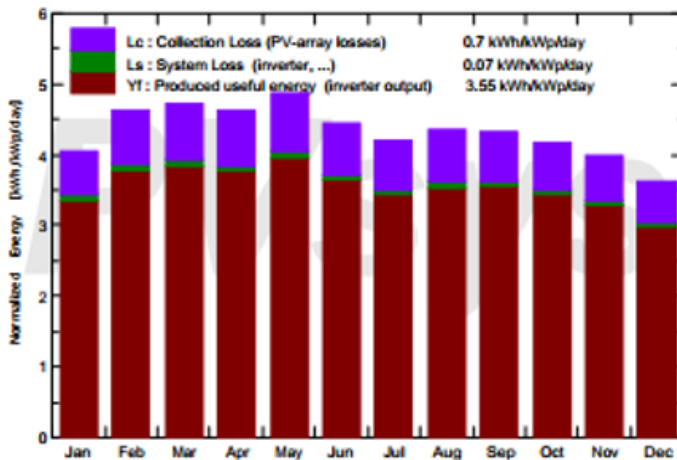
$$\begin{aligned} \text{Daya 460 PV} &= 460 \times 265 = 121900 \text{ Wp} \\ &= 121,9 \text{ kWp} \end{aligned}$$

$$\text{Energi bersih perhari} = 3,55 \frac{kWh}{kWp} / \text{hari}$$

$$\text{Energi bersih setahun} = 3,55 \times 365 = 1295 \frac{kWh}{kWp} / \text{tahun}$$

$$\text{Energi total} = 1295 \times 121,9 = 157,8 \text{ MWh/th}$$

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 122 kWp



Gambar 4.20 Rata-Rata Energi Harian yang Dihasilkan PLTS Ukui

4.5.2 Biaya Investasi PLTS Ukui-Lirik

Biaya investai PLTS Ukui-Lirik dihitung berdasarkan biaya peralatan dan biaya pengerjaan proyek. Biaya investasi ini akan dijadikan dasar untuk analisis ekonomi lainnya. Bersama dengan potensi energi PLTS, biaya investasi dapat digunakan untuk menghitung biaya pembangkitan energi listrik per-kWh. Pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 ditampilkan data-data peralatan yang dibutuhkan beserta biaya-biaya yang diperlukan untuk membangun PLTS Ukui-Lirik.

Tabel 4.9 Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Lirik

Nama Peralatan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah	Harga Total (Rp)
Modul dan Support			
Panel Surya 265 Wp	2.340.000/unit	2835 unit	6.619.860.000
Panel Support	304.000/m ²	4612 m ²	1.402.048.000
Grounding System	25.275.000/set	3 set	75.825.000
Perlengkapan Inverter			
Inverter 50 kVA	148.000.000/unit	15 unit	2.220.000.000
Cluster Controller	17.582.600/unit	1 unit	17.582.600
Fuel Save Control	370.000.000/unit	1 unit	370.000.000
AC Combiner	19.950.000/set	3 set	59.850.000
Kabel dan Aksesoris			
Kabel PV-Inverter (NYAF 1 x 4 mm ²)	6.800/m	3450 m	23.460.000
Kabel Inv.-AC Comb. (NYFGBY 4 x 6 mm ²)	36.000/m	1400 m	50.400.000
Kabel AC Comb.-LVCB (N2XSY 1 x 35 mm ²)	97.250/m	240 m	23.340.000
Kabel LVCB-Trafo (N2XSY 1 x 300 mm ²)	488.500/m	80 m	39.080.000
Kabel Trafo-Substation (N2XSEFGbY 3 x 35 mm ²)	285.000/m	250 m	71.250.000
Kabel Monitoring Syst. (UTP cat 6)	5.400/m	700 m	3.780.000
Aksesoris kabel (RJ45 cat 6)	9.000/biji	64 biji	576.000
Peralatan Interkoneksi			
Cubicle	204.000.000/unit	1 unit	204.000.000
Transformator 1 MVA	152.000.000/unit	1 unit	152.000.000
LVCB	99.000.000/unit	1 unit	99.000.000
Power House 40 m ²	2.750.000/m ²	40 m ²	110.000.000
Grounding	20.025.000/set	1 set	20.025.000

Tabel 4.9 Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Lirik

Nama Peralatan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah	Harga Total (Rp)
Wireless Modem Router	2.000.000/unit	1 unit	2.000.000
Pengerjaan Proyek			
Pemasangan Modul			105.300.000
Pemasangan Inverter			44.400.000
Instalasi Kabel			22.300.000
Kantor Proyek (2,4 m x 12 m)			21.600.000
Pengadaan Air dan Listrik			15.000.000
Biaya Tambahan			
Pengiriman Barang			275.000.000
Desiain, Testing, Comissioning			200.000.000
Persiapan Lahan			1.348.180.000
Pemasangan Pagar	1.131.000	514 m	581.334.000
TOTAL			14.181.270.600

Tabel 4.10 Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Ukui

Nama Peralatan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah	Harga Total (Rp)
Modul dan Support			
Panel Surya 265 Wp	2.340.000/unit	460 unit	1.076.400.000
Panel Support	304.000/m ²	752 m ²	228.608.000
Grounding System	25.275.000/set	3 set	75.825.000
Perlengkapan Inverter			
Inverter 25 kVA	81.000.000/unit	5 unit	405.000.000
Cluster Controller	17.582.600/unit	1 unit	17.582.600
AC Combiner	13.300.000/set	1 set	13.300.000
Kabel dan Aksesoris			
Kabel PV-Inverter (NYAF 1 x 4 mm ²)	6.800/m	600 m	4.080.000

Tabel 4.10 Data Peralatan dan Biaya Pembangunan PLTS Ukui

Nama Peralatan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah	Harga Total (Rp)
Kabel Inv.-AC Comb. (NYFGBY 4 x 6 mm ²)	36.000/m	1500 m	54.000.000
Kabel AC Comb.-LVCB (N2XSY 1 x 120 mm ²)	211.000/m	80 m	16.880.000
Kabel Monitoring Syst. (UTP cat 6)	5.400/m	300 m	1.620.000
Aksesoris kabel (RJ45 cat 6)	9.000/biji	24 biji	216.000
Peralatan Interkoneksi			
MCCB	15.000.000/set	1 set	15.000.000
Wireless Modem Router	2.000.000/unit	1 unit	2.000.000
Pengerjaan Proyek			
Pemasangan Modul			42.750.000
Pemasangan Inverter			20.250.000
Instalasi Kabel			16.500.000
Kantor Proyek (2,4 m x 12 m)			21.600.000
Pengadaan Air dan Listrik			15.000.000
Biaya Tambahan			
Pengiriman Barang			42.000.000
Desain, Testing, Comissioning			32.500.000
Persiapan Lahan			230.300.000
Pemasangan Pagar	1.131.000	172 m	194.532.000
TOTAL			2.523.563.600

Tabel 4.11 Biaya Investasi PLTS Ukui-Lirik

Site PLTS	Biaya Proyek (Rp)
Lirik	14.181.270.600
Ukui	2.523.563.600
TOTAL	16.704.834.200
PPN 10%	1.670.483.420
Biaya Investasi	18.375.317.620

Dari data di atas, total biaya peralatan dan pengerjaan proyek PLTS Lirik adalah sebesar Rp 14.181.270.600 sedangkan untuk PLTS Ukui, biaya

yang dihabiskan sebesar Rp 2.523.563.600. Biaya total yang dibutuhkan untuk membangun PLTS Lirik dan Ukui adalah sebesar Rp 16.704.834.200. Biaya total pembangunan ini akan dikenakan Pajak Pertambahan Nilai (PPN) sebesar 10%. Biaya investasi pembangunan PLTS Ukui-Lirik merupakan total biaya pembangunan ditambah dengan PPN 10%. Sehingga besar biaya investasi PLTS Ukui-Lirik adalah Rp 18.375.317.620. Dalam tugas akhir ini, biaya investasi yang digunakan untuk pembangunan PLTS didapat dari pinjaman dari bank.

4.5.3 Biaya Pembangkitan Energi Listrik

Biaya pembangkitan energi listrik dihitung berdasarkan biaya pengeluaran dan potensi energi PLTS Ukui-Lirik pertahun. Biaya pengeluaran pertahun dihitung dari besarnya angsuran untuk mencicil pinjaman investasi dari bank. Dalam tugas akhir ini diasumsikan waktu pengembalian pinjaman investasi yang harus dilakukan Pertamina EP Ukui-Lirik adalah 15 tahun dengan suku bunga sebesar 11% [9]. Biaya angsuran pertahun yang harus dibayarkan adalah sebagai berikut.

$$\text{Angsuran pertahun} = \text{Investasi} \times i \times \frac{1}{1 - \frac{1}{(1+i)^m}}$$

Dengan

i = suku bunga

m = lama waktu pengembalian

$$\text{Angsuran pertahun} = \text{Rp } 18.375.317.620 \times 11\% \times \frac{1}{1 - \frac{1}{(1+11\%)^{15}}}$$

$$\text{Angsuran pertahun} = \text{Rp } 2.555.367.946$$

Biaya yang harus dikeluarkan Pertamina EP Ukui-Lirik mengangsur pinjaman dari bank sebesar Rp 2.555.367.946 pertahun selama 15 tahun. Selain biaya angsuran, Pertamina EP Ukui-Lirik juga perlu mengeluarkan biaya operasional dan pemeliharaan PLTS. Biaya operasional dan pemeliharaan yang harus dikeluarkan berkisar \$10-45/kW dalam setiap tahun [10]. Biaya pemeliharaan digunakan untuk melakukan perawatan *site* secara umum, inspeksi kabel, pembersihan PV, pemotongan rumput dan tanaman yang mengganggu, pemeliharaan inverter, dan biaya-biaya lain menyesuaikan kebutuhan. Dalam tugas akhir ini akan diambil biaya operasional dan pemeliharaan PLTS sebesar \$30/kW-tahun dengan asumsi pemeliharaan PLTS di Indonesia tidak

serumit pemeliharaan PLTS pada negara empat musim serta standar gaji Indonesia yang tidak terlalu tinggi.

$$\text{Biaya O\&M pertahun} = \$30/\text{kW} - \text{tahun} \times 870\text{kW} \times \text{Rp } 13.951$$

$$\text{Biaya O\&M pertahun} = \text{Rp } 364.121.100$$

$$\text{Pengeluaran Pertahun} = \text{Rp } 2.555.367.946 + \text{Rp } 364.121.100$$

$$\text{Pengeluaran Pertahun} = \text{Rp } 2.919.489.046$$

Dengan adanya biaya operasional dan pemeliharaan, maka total biaya pertahun yang harus dikeluarkan Pertamina EP Ukui-Lirik sebesar Rp 2.919.489.046. Dengan mengetahui biaya pengeluaran selama setahun, biaya pembangkitan energi listrik dapat dihitung sebagai berikut.

$$\text{Biaya Pembangkitan} = \frac{\text{Total Pengeluaran pertahun}}{\text{Potensi Energi PLTS Ukui - Lirik}}$$

$$\text{Biaya Pembangkitan} = \frac{\text{Rp } 2.919.489.046}{966,8 \text{ MWh} + 157,8 \text{ MWh}} = \text{Rp } 2.596/\text{kWh}$$

4.5.4 Biaya Penghematan

Adanya PLTS, seharusnya mampu mengurangi biaya pemakaian energi listrik. Pada bagian ini akan dihitung biaya yang mampu dihemat oleh Pertamina EP Ukui-Lirik setelah adanya pemasangan PLTS. Pada perhitungan ini, energi yang dihasilkan PLTS akan dibandingkan dengan energi yang dihasilkan dari PLTG yang ada pada Pertamina EP ukui-Lirik. Tabel 4.12 menunjukkan biaya operasional PLTG beserta energi yang dapat dihasilkan selama satu tahun.

Tabel 4.12 Biaya Operasional PLTG Ukui-Lirik dan Energinya

Bulan	Biaya (Gas, O&M) (Rp)	Energi (kWh)
Januari	12.222.539.780	3.521.170
Februari	10.691.262.693	3.209.368
Maret	12.012.971.863	3.507.529
April	11.673.466.756	3.327.835
Mei	12.110. 875.807	3.404.238
Juni	11.166.004.092	3.281.073
Juli	11.849.421.258	3.416.662

Tabel 4.12 Biaya Operasional PLTG Ukui-Lirik dan Energinya

Bulan	Biaya (Gas, O&M) (Rp)	Energi (kWh)
Agustus	12.090.728.372	1.561.365
September	11.626.674.638	3.319.267
Oktober	12.234.985.570	3.449.523
November	11.948.228.070	3.404.073
Desember	12.171.132.330	3.610.365
TOTAL	141.862.301.229	39.012.468

Untuk mendapatkan biaya penghematan, data pada Tabel 4.12 akan digunakan untuk menghitung biaya pembangkitan energi PLTG Ukui-Lirik.

$$\text{Biaya Pembangkitan} = \frac{\text{Total Operasional PLTG}}{\text{Total Energi yang Dihasilkan}}$$

$$\text{Biaya Pembangkitan} = \frac{\text{Rp } 141.862.301.229}{39.012.468 \text{ kWh}} = \text{Rp } 3.636,33/\text{kWh}$$

Energi yang dihasilkan oleh PLTG sebagian akan diganti oleh energi dari PLTS sebesar 1.124.600 kWh (energi PLTS Ukui-Lirik). Biaya yang dapat dihemat dapat dicari dari perhitungan di bawah ini.

$$\text{Penghematan} = \text{Energi PLTS} \times \text{Pembangkitan PLTG}$$

$$\text{Penghematan} = 1.124,600 \text{ kWh} \times \text{Rp } 3.636,33/\text{kWh}$$

$$\text{Penghematan} = \text{Rp } 4.089.419.412$$

Dengan melakukan pemasangan PLTS, Pertamina EP Ukui-Lirik dapat menghemat biaya sebesar Rp 4.089.419.412

4.5.5 Net Present Value PLTS Ukui-Lirik

Net Present Value (NPV) merupakan penentu kelayakan pengerjaan proyek ini dari segi ekonomi. Untuk menghitung NPV, umur proyek PLTS ini diasumsikan bertahan hingga 25 tahun dengan suku bunga 11%. Nilai keuntungan pengerjaan proyek ini diambil dari biaya yang dapat dihemat yaitu sebesar Rp 4.089.419.412.

Tabel 4.13 *Net Present Value* PLTS Ukui-Lirik

Tahun	Biaya Investasi (Rp)	Arus Kas Masuk (Rp)	Nilai Kas (Rp)
0	18.375.317.620	0	-18.37.317.620
1		4.089.419.412	3.684.161.632
2		4.089.419.412	3.319.064.533
3		4.089.419.412	2.990.148.228
4		4.089.419.412	2.693.827.232
5		4.089.419.412	2.426.871.381
6		4.089.419.412	2.186.370.613
7		4.089.419.412	1.969.703.255
8		4.089.419.412	1.774.507.437
9		4.089.419.412	1.598.655.348
10		4.089.419.412	1.440.230.044
11		4.089.419.412	1.297.504.544
12		4.089.419.412	1.168.923.012
13		4.089.419.412	1.053.083.795
14		4.089.419.412	948.724.139
15		4.089.419.412	854.706.432
16		4.089.419.412	770.005.794
17		4.089.419.412	693.698.914
18		4.089.419.412	624.953.976
19		4.089.419.412	563.021.600
20		4.089.419.412	507.226.667
21		4.089.419.412	456.960.961
22		4.089.419.412	411.676.542
23		4.089.419.412	370.879.767
24		4.089.419.412	334.125.916
25		4.089.419.412	301.014.339.
TOTAL			16.064.728.494

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa NPV bernilai positif sehingga proyek pembangunan PLTS ini layak dilakukan dari segi ekonomi.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data yang diperoleh dan analisis data, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Semakin tinggi nilai *irradiance*, daya yang dibangkitkan PLTS akan semakin tinggi sehingga daya yang dibangkitkan generator *swing* akan turun.
2. Pada sistem kelistrikan *site* Lirik konfigurasi lama, faktor daya generator hanya mengalami sedikit fluktuasi (berkisar 80%) sehingga konfigurasi ini layak untuk dioperasikan.
3. Pada sistem kelistrikan *site* Ukui, faktor daya generator mengalami penurunan tetapi masih pada batas yang cukup baik yaitu antara 78%-74%.
4. Pemasangan PLTS akan menambah arus hubung singkat pada sistem.
5. Berdasarkan hasil analisis transien, sistem dapat kembali stabil.
6. PLTS 870 kW yang dipasang mampu menghasilkan energi sebesar 1124,6 MWh pertahun.
7. Pemasangan PLTS mampu menghemat biaya sebesar Rp 4.089.419.412 pertahun.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian tugas akhir ini diantaranya:

1. Analisis hubung singkat dan koordinasi proteksi dapat digunakan sebagai rekomendasi untuk diterapkan pada proyek pemasangan PLTS ini guna menjaga keandalan sistem.
2. Dengan adanya keterbatasan data, sebaiknya dilakukan studi kelayakan yang lebih mendalam untuk melaksanakan proyek ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), *REthinking Energy*, vol. 55, no. July. 2017.
- [2] O. G. Mrehel, A. S. Shamek, and M. D. Hamouda, "Power system transient stability investigation in the presence of photovoltaic generation," *2016 17th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2016 - Proc.*, pp. 563–568, 2017.
- [3] O. A. Afolabi, W. H. Ali, P. Cofie, J. Fuller, P. Obiomon, and E. S. Kolawole, "Analysis of the Load Flow Problem in Power System Planning Studies," *Energy Power Eng.*, no. 7, pp. 509–523, 2015.
- [4] P. Kundur *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [5] Wahyudi, "Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
- [6] Schneider Electric, "*Protection and Control Sepam 1000*", Germany, 1998.
- [7] R. Swami, "Solar Cell," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 7, pp. 1–5, 2012.
- [8] Afandi, "Analisis Studi Kelayakan Investasi Pengembangan," pp. 1–14, 2007.
- [9] Bank Indonesia, "Suku Bunga Dasar Kredit," 2016. [Online] Available: <https://www.bi.go.id/id/perbankan/suku-bunga-dasar/Default.aspx>. [Accessed 07 05 2018]
- [10] Electric Power Research Institute, "BUDGETING FOR SOLAR PV PLANT OPERATIONS & MAINTENANCE: PRACTICES AND PRICING," no. December, p. 11, 2015.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Berasal dari daerah pelosok kota yang berada di pelosok Jawa Timur, tepatnya di kota yang terkenal akan kesenian Reyognya, yaitu Kabupaten Ponorogo. Lahir pada hari Senin tanggal 16 Oktober 1995. Memulai pendidikan di Taman Kanak-Kanak Dharmawanita Bancangan, Sambit, Ponorogo kemudian masuk di SDN 1 Bancangan pada tahun 2002. Lalu pada tahun 2008 melanjutkan pendidikan ke SMPN 1 Jetis Ponorogo dan 3 tahun

setelahnya melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Ponorogo hingga lulus pada tahun 2014 dan melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa perkuliahan aktif dalam beberapa kepanitiaan serta kegiatan himpunan departemen kewirausahaan.

Email	: abinaditama16oct@gmail.com
Hp/WA	: 082228897894